

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra telekomunikační techniky**

**Studium komunikace mezi vozidly s využitím LED technologií**  
**Study of Vehicle-to-Vehicle Communication Using LED**  
**Technology**

**2015**

**Bc. Jiří Kummer**

# Zadání diplomové práce

Student:

**Bc. Jiří Kummer**

Studijní program:

N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601T013 Telekomunikační technika

Téma:

**Studium komunikace mezi vozidly s využitím LED technologií**  
**Study of Vehicle-to-Vehicle Communication Using LED Technology**

Zásady pro vypracování:

1. Popište parametry a vlastnosti zdrojů optického záření v podobě LED používaných v automobilovém průmyslu při konstrukci světel.
2. Popište parametry a vlastnosti světlovodů používaných v automobilovém průmyslu při konstrukci světel.
3. Analyzujte vlastnosti světlovodu z hlediska fotometrických veličin a homogenity vyzařovaného optického záření na modelu automobilového světla.
4. Navrhněte a zkonstruujte modulátor LED zdroje optického záření pro komunikaci mezi vozidly, změřte šířku pásma modulátoru.
5. Proveďte analýzu přenosových vlastností automobilového světla na základě zkonstruovaného modulátoru se světlovodem a bez světlovodu, výsledky porovnejte.

Seznam doporučené odborné literatury:

SCHUBERT, E. *Light-emitting diodes*. 2nd ed. Cambridge University Press, 2006. ISBN 05-218-6538-7.


HRANILOVIC, Steve. *Wireless optical communication systems*. New York: Springer, 2005. ISBN 03-872-2784-9.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Koudelka**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.  
vedoucí katedry

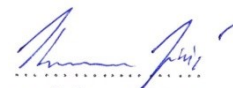


  
\_\_\_\_\_  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 5. Května 2015



.....  
podpis studenta

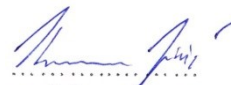
## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Koudelkovi a firmě Varroc Lighting Systems s.r.o. za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této diplomové práce. Děkuji také Ing. Radkovi Martinkovi za pomoc při řešení odborné části týkající se softwaru a hardwaru od firmy National Instruments. A v neposlední řadě bych chtěl také poděkovat mé rodině a přítelkyni za trpělivost a podporu během celého studia.

## **Prohlášení zástupce spolupracující právnické nebo fyzické osoby**

„Souhlasím se zveřejněním této diplomové práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v magisterských programech VŠB-TU Ostrava.“

Dne: 5. května 2015

  
.....  
podpis studenta

## **Abstrakt**

KUMMER, Jiří. *Studium komunikace mezi vozidly s využitím LED technologií : diplomová práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra telekomunikační techniky, 2015, 75s. Vedoucí práce: Koudelka, Petr.

Diplomová práce se zabývá automobilovou komunikací V2V s využitím technologie LED, z hlediska vysílací strany. Konkrétně využitím této technologie u obrysové a brzdové funkce v zadním světle Škoda Octavia III. Teoretická část se zaměřuje na vlastnosti světlovodů a jejich vývoj v automobilovém průmyslu, komunikačními sběrníkovými systémy a modulačními formáty. Praktická část je tvořena souborem měření s navrženým vysílacím systémem v temné místnosti VŠB – TUO a výzkumném oddělení firmy Varroc Lighting Systems s.r.o. Zde bylo cílem tento systém nejdříve implementovat na každou funkci samostatně a následně zjistit zdali dochází k ovlivnění komunikace vlivem současného svitu obou funkcí. U testování kvality komunikace se zjišťuje přenosová rychlost a chybovost vzhledem k stanoveným referenčním vzdálenostem, nosné frekvenci a počtu stavů modulace. Dále pak vliv na změnu optického výkonu, fotometrie a homogenity vyzařovaného optického záření obou funkcí využívají LED, před a po integraci modulačního systému.

## **Klíčová slova**

Bias-tee; brzdová funkce; fotometrie; homogenita; LED; modulace; obrysová funkce; PSK; QAM; světlovod; Škoda Octavia III.; V2V komunikace; VLC; sofistikovaný; automobilový průmysl

## **Abstract**

KUMMER, Jiří. Study of Vehicle-to-Vehicle Communication Using LED Technology : *Master thesis*. Ostrava: VSB - Technical University of Ostrava, Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Department of Telecommunications, 2015, 75s. Supervisor: Koudelka, Peter.

The master thesis deals with automobile V2V communication using LED technology, in terms of the transmitting side. Specifically, the use of this technology is regarding the contour and function of the rear brake light in Skoda Octavia III. The theoretical part focuses on features of fiber optics and development in motor industry, communication bus systems and modulation formats. The practical part is composed of a set of measurements with the desired broadcast system in a dark room VSB - TUO and research department of the company Varroc Lighting Systems Ltd. Where the aim is to implement the system first for each function separately and subsequently determine whether the communication is affected by the influence of the current irradiation of both functions. In testing the quality of communication, the baud rate and errors are detected due to the determined reference distances, the carrier frequency and the number of states of the modulation. Furthermore, the effect of changing the optical power and homogeneity photometry of optical radiation emitted by the two functions use the LED before and after the integration of the modulation system.

## **Key words**

Bias-tee; brake function; photometry; homogeneity; LED; modulation; sidelights; PSK; QAM; light-guide; Škoda Octavia III.; V2V communication; VLC; sophisticated; automotive industry

## Seznam použitých zkratk

Zkratka	Význam
<b>AlGaAs</b>	aluminium gallium arsenide
<b>AlGaInP</b>	aluminium gallium indium phosphide
<b>AlGaN</b>	aluminum gallium nitride
<b>AlGaP</b>	aluminium gallium phosphide
<b>AlInGaP</b>	aluminum Indium gallium phosphide
<b>AlN</b>	aluminium nitride
<b>ASK</b>	Amplitude Shift Keying (Amplitudové koučování)
<b>BER</b>	Bit Error Rate (Bitová chybovost)
<b>CAN</b>	Controller Area Network (Síťový komunikační protokol)
<b>CIE</b>	International Commission on Illumination (Mezinárodní komise pro osvětlování)
<b>ECE</b>	Economic Commission for Europe (Evropská hospodářská komise OSN)
<b>EHK</b>	Evropská hospodářská komise
<b>FSK</b>	Frequency Shift Keying (Kmitočtové klíčování)
<b>GaAs</b>	gallium arsenide
<b>GaAsP</b>	gallium arsenide phosphide
<b>GaN</b>	gallium nitride
<b>GaP</b>	gallium phosphide
<b>InGaN</b>	indium gallium nitrid
<b>LED</b>	Light-Emitting Diode (Světlo emitující dioda)
<b>LIN</b>	Local Interconnect Network (Lokální přepojovací síť)
<b>MOST</b>	Media Oriented Systems Transport (Multimediální automobilová sběrnice)
<b>OLED</b>	Organic Light-Emitting Diode (Organická světlo emitující dioda)
<b>OSN</b>	Organizace spojených národů
<b>PSK</b>	Phase Shift Keying (Fázové klíčování)
<b>QAM</b>	Quadrature Amlitude Modulation (Kvadrurní amplitudová modulace)
<b>QPSK</b>	Quadrature Phase Shift Keying (Kvadrurní fázové klíčování)



---

<b>SER</b>	Symbol Error Rate (Symbolová chybovost)
<b>SiC</b>	silicon karbide
<b>VLC</b>	Visible Light Communication (Optické záření ve viditelné oblasti spektra)
<b>V2V</b>	Vehicle-to-Vehicle (Komunikace mezi vozidly)
<b>YAG</b>	yttrito-hlinitý granát
<b>YAG:Ce</b>	žlutý luminofor ( $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}_3$ )

---

# Obsah

Úvod.....	- 13 -
1 Zdroje optického záření.....	- 14 -
1.1 Druhy optických zdrojů využívaných v automobilovém průmyslu .....	- 14 -
1.1.1 LED .....	- 14 -
1.1.2 OLED .....	- 17 -
1.2 Technické normy v legislativě .....	- 18 -
1.3 CIE XYZ .....	- 19 -
1.4 Sběrnice.....	- 21 -
1.4.1 CAN .....	- 21 -
1.4.2 LIN .....	- 22 -
1.4.3 MOST.....	- 22 -
1.4.4 FlexRay .....	- 22 -
2 Parametry LED používaných v automobilovém průmyslu .....	- 24 -
2.1 Elektrické vlastnosti .....	- 25 -
2.1.1 Převodová charakteristika .....	- 25 -
2.1.2 Volt-ampérová charakteristika .....	- 25 -
2.2 Fotometrické vlastnosti .....	- 26 -
2.2.1 Jas.....	- 26 -
2.2.2 Světelný tok.....	- 27 -
2.2.3 Intenzita.....	- 28 -
2.2.4 Prostorový úhel.....	- 28 -
2.2.5 Svítivost.....	- 29 -
2.2.6 Světlo technické vlastnosti materiálu .....	- 29 -
3 Optický světlovod .....	- 31 -
3.1 Tvar světlovodu.....	- 32 -
4 Světlovody používané v automobilovém průmyslu .....	- 37 -
4.1 Aplikace světlovodů.....	- 37 -
4.1.1 Světlovod plnící zadní obrysovou funkci (norma ECE R07).....	- 37 -
4.1.2 Světlovod plnící funkci pro denní svícení (norma ECE R87).....	- 38 -

4.2	Princip světlovodu.....	- 39 -
4.3	Homogenita světlovodu.....	- 40 -
4.4	Evoluce světlovodů podle výrobců automobilů .....	- 41 -
4.4.1	BMW .....	- 41 -
4.4.2	AUDI .....	- 42 -
5	Zadní světlo Škoda Octavia III.....	- 43 -
5.1	Experimentální měření základních parametrů a charakteristik obrysového a brzdového světla.....	- 45 -
5.1.1	Volt-ampérová charakteristika .....	- 47 -
5.1.2	Převodová charakteristika .....	- 48 -
5.1.3	Spektrální charakteristika .....	- 48 -
5.1.4	Vyzařovací charakteristika .....	- 49 -
5.2	Experimentální měření fotometrických veličin a homogenity vyzařovaného optického záření obrysového a brzdového světla.....	- 50 -
5.2.1	Analýza fotometrických veličin vyzařovaného optického záření obrysového a brzdového světla.....	- 50 -
5.2.2	Analýza homogenity vyzařovaného optického záření obrysového a brzdového světla.....	- 52 -
6	Digitální modulace .....	- 55 -
6.1	Typy modulací.....	- 55 -
6.1.1	Amplitudové klíčování .....	- 55 -
6.1.2	Frekvenční klíčování .....	- 56 -
6.1.3	Fázové klíčování.....	- 57 -
6.1.4	Kvadrurní amplitudová modulace .....	- 57 -
6.1.5	Ortgonální multiplex s kmitočtovým dělením.....	- 58 -
6.2	Základní parametry modulací.....	- 59 -
6.2.1	Šírka pásma modulovaného signálu .....	- 59 -
6.2.2	Modulační a přenosová rychlost.....	- 60 -
6.3	Hodnocení přenosového spoje.....	- 60 -
6.3.1	SNR .....	- 61 -
6.3.2	BER .....	- 61 -
6.3.3	MER .....	- 61 -

6.3.4	EVM .....	- 62 -
6.3.5	Diagram oka .....	- 62 -
6.3.6	IQ diagram.....	- 63 -
7	Návrh a konstrukce vysílací části komunikace mezi vozidly.....	- 64 -
7.1	Optické bez vláknové datové sítě.....	- 64 -
7.2	Pracovní oblast brzdového světla .....	- 64 -
7.3	Návrh modulátoru .....	- 65 -
7.3.1	Bias-Tee ZX85-12G .....	- 66 -
7.4	Testování modulátoru.....	- 67 -
8	Realizace experimentu s využitím navrženého systému .....	- 69 -
8.1	Měřicí soustava .....	- 70 -
8.1.1	Plankonvexní (PCX) čočka .....	- 71 -
8.2	Analýza modulací pomocí sofistikovaného softwaru LabVIEW 7 .....	- 71 -
8.3	PSK klíčování.....	- 73 -
8.3.1	Přenosová rychlost M-PSK .....	- 75 -
8.3.2	Chybovost M-PSK .....	- 76 -
8.4	QAM modulace .....	- 77 -
8.4.1	Přenosová rychlost M-QAM .....	- 81 -
8.4.2	Chybovost M-QAM .....	- 82 -
9	Vyhodnocení fotometrických veličin a homogenity při použití pokročilých modulačních formátů .....	- 84 -
	Závěr .....	- 87 -
	Použitá literatura .....	- 89 -
	Seznam příloh.....	- 92 -

## Úvod

Diplomová práce se zabývá studiem komunikace mezi vozidly V2V (Vehicle-to-Vehicle) s využitím LED (Light-Emitting Diode) technologií z hlediska vysílací strany. Pro tuto optickou bezvláknovou komunikaci, v oblasti viditelného spektra VLC (Visible Light Communication), je využit optický zdroj zadního světla Škoda Octavia III. Tato studie reaguje na zvyšující se počet účastníků na pozemní komunikaci a narůst nehodovosti s tímto spojený. Proto je cílem EU tuto skutečnost redukovat a zvýšit bezpečnost pomocí V2V komunikace mezi vozidly.

V první části práce je teoreticky rozebrán vývoj a trend světlovodů a současně jsou popsány parametry a vlastnosti zdrojů optického záření v podobě LED využívaných v automobilovém průmyslu při konstrukci světel. Největší důraz je kladen na schopnost nasazení automobilových světel, využívající technologii LED, jako optický vysílač v komunikaci V2V. Konkrétně se v této práci jedná o brzdové a obrysové funkce, které by v případě potřeby komunikovaly s automobily za nimi. Vlivem takové komunikace by došlo ke zrychlení reakcí, které byly doposud pomalejší, jelikož byly závislé pouze na lidských smyslech.

Hlavní část této práce je věnována praktickému experimentálnímu měření v prostorách Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava v laboratořích katedry telekomunikační techniky a odborným měřením na výzkumném oddělení firmy Varroc Lighting Systems s.r.o.

V počáteční fázi se praktická část věnuje analýze brzdové a obrysové funkce, využívající soustavu světlovodů, z hlediska základních parametrů a charakteristik. V pokročilé fázi je navrhnut koncept vysílacího systému, který by bylo reálně možné implementovat do automobilových světel. Konkrétně se jedná o modulaci funkcí zadního světla Škoda Octavia III., které využívají optický zdroj technologie LED. Cílem je tento systém nejdříve implementovat na každou funkci samostatně a následně zjistit zdali dochází k ovlivnění, či zhoršení komunikace vlivem současného svitu obou funkcí. Generování signálů pro tento navrhovaný koncept bude prováděn pomocí hardwaru a softwaru od firmy National Instruments. V návaznosti na tuto část jsou zde rozepsány testované pokročilé formáty modulací, které budou použity pro samotné měření.

Vyhodnocení možnosti komunikace probíhá analýzou dosažených přenosových rychlostí a chybovosti přenosu, v podobě parametrů MER a  $EVM_{RMS}$ , vzhledem ke stanoveným referenčním vzdálenostem, nosné frekvenci a počtu stavů modulace. Dále je zkoumán vliv těchto stanovených vlastností ovlivňující komunikaci na změnu optického výkonu zadního světla. Důležitou úlohu hraje měření fotometrie a homogenity vyzařovaného optického záření funkcí využívající LED, před a po integraci modulačního systému. Výsledky jsou statisticky vyhodnocené vzhledem k zákonným předpisům ECE R08, týkajících se obrysových funkcí.

# 1 Zdroje optického záření

## 1.1 Druhy optických zdrojů využívaných v automobilovém průmyslu

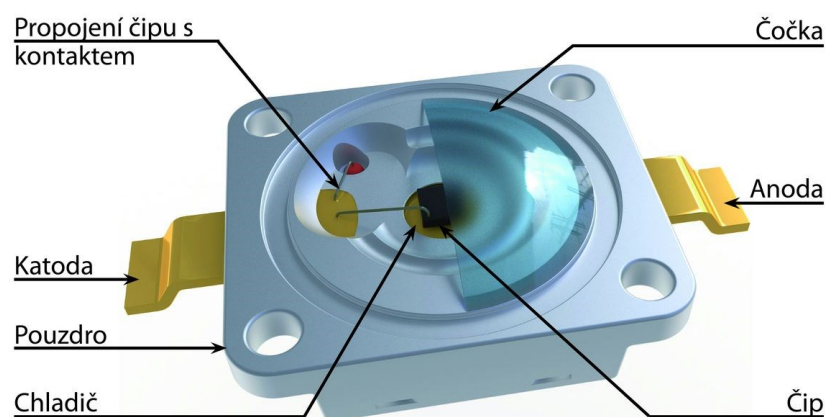
V automobilovém průmyslu je aktuálně využíváno několika typů zdrojů světla a neustále se vyvíjejí nové trendy, které posunují automobilové osvětlení na vyšší úroveň. Několikaletým ověřeným zdrojem světla jsou žárovky a výbojky. Mezi inovativnější zdroje, které se snaží tuto technologii nahradit, mohou být světlo-emitující diody (LED), organické diody (OLED) nebo laserový paprsek, který byl poprvé představen v roce 2011 na modelu BMW i8. V zásadě lze říci, že je tento trend určován několika charakteristickými cíli, o jejichž dosažení usilují všichni přední automobiloví výrobci. Jako klíčové stimuly, s ohledem na budoucnost, lze brát především design, zvýšení bezpečnosti, úsporu nákladů, zvýšení spolehlivosti a pohodlí řidiče.

Jelikož jsou světla jedním z nejdominantnějších prvků vzhledu celého automobilu, mají výrobci snahu zaujmout případného zákazníka a současně se odlišit od konkurence atraktivním a specifickým designem, který splňuje potřebné normy. Dále pak je kladen důraz na zvýšení aktivní bezpečnosti, čímž se rozumí to, aby řidič ve směru jízdy lépe viděl své přilehlé okolí. U tohoto požadavku nejde jen o světelný výkon, ale pro lepší komfort se také zlepšuje kvalita světla a jeho přesné nasměrování. Důležitá je i pasivní bezpečnost, kdy je nutné zajistit to, aby byl řidič viděn ostatními. Pasivní bezpečnost se nejvíce zaměřuje na povinné denní svícení, které je spojeno se snížením výkonu, proto je kladen důraz na úspornější světla, která při stejném výkonu dosahují potřebné efektivity osvětlení.

### 1.1.1 LED

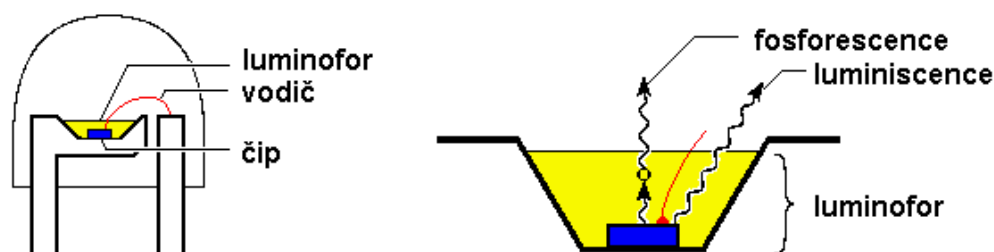
Přímo emitující světelné záření LED (Light Emitting Diode) bylo z počátku využíváno pouze pro výkonnostně méně náročné funkce a sloužilo pouze pro zvýraznění křivek a tvarů vozu. Postupem času se však jeho využití rozšířilo na takovou úroveň, že může kompletně nahradit osvětlení vozidla. Jedná se tedy o velmi efektivní výbojový světelný zdroj, který je nárazuvzdorný, má delší životnost svitu a vzhledem k poměrně malým rozměrům, umožňuje variabilní design. Současně se rozšířilo množství producentů LED, mezi největší hráče na trhu patří: Osram, Nichia a Phillips.

Tato polovodičová součástka (viz. obr. 1.1) vyzařuje, širokospektrální světlo při průchodu proudu v propustném směru. Svíticí efekt je následkem zářivé rekombinace elektron-děrového páru a je formou elektroluminiscenční. Konkrétní barva vyzařovaného světla, následně závisí na chemickém složení použitého anorganického polovodičového materiálu (viz. tab. 1.1), a vlnová délka záření je u jednočipových LED pevně dána velikostí zakázaného pásma PN přechodu.



Obrázek 1.1: Konstrukce jednočipové (single chip) LED s chladičem

Specifickou variantou jsou bílé LED. Kromě 3 čipových bílých LED se vyrábí z cenových důvodů také LED s modrým čipem, která stimuluje sekundární fluorescenci vhodně zvoleného typu aktivní vrstvy fosforu (luminoforu). Primární modré světlo diody se míchá se žlutým světlem, které emituje fosfor, čímž vznikne světlo, které je okem vnímáno jako bílé (viz. obr. 1.2) [34].



Obrázek 1.2: Konstrukce a princip bílé LED

Vlnová délka fotonu je závislá na jeho energii, která je nepřímo úměrná vlnové délce záření, takže s rostoucí energií bude mít foton menší vlnovou délku. Současně se mění přímo úměrně velikost prahového napětí v závislosti na rostoucí šířce zakázaného pásma. Tyto závislosti jsou vyjádřeny následujícím vztahem.

$$E = \frac{hc}{\lambda} = eU \quad (1.1)$$

Vhodnou dotací můžeme ovlivnit vlnovou délku emitovaného světla, která je závislá na použitém polovodiči. Při polovodičích z křemíku Si a germania Ge je pravděpodobnost dosažení zářivé rekombinace velmi malá. Z tohoto důvodu se používají sloučeniny s prvky z třetího a pátého sloupce periodické soustavy prvků. (viz tab. 1.1)

Tabulka 1.1: *Závislost barvy na materiálu, vlnové délce a napětí [32]*

Barva světla	Vlnová délka [nm]	Napětí [V]	Materiál
Infračervená	$\lambda > 760$	$< 1,9$	GaAs, AlGaAs
Červená	$610 < \lambda < 760$	1,63 - 2,03	AlGaAs, GaAsP, AlGaInP, GaP
Oranžová	$590 < \lambda < 610$	2,03 - 2,10	GaAsP, AlGaInP, GaP
Žlutá	$570 < \lambda < 590$	2,10 - 2,18	GaAsP, AlGaInP, GaP
Zelená	$500 < \lambda < 570$	1,9 – 4	InGaN/GaN, GaP, AlGaInP, AlGaP
Modrá	$450 < \lambda < 500$	2,48 - 3,7	ZnSe, InGaN, SiC, Si
Fialová	$400 < \lambda < 450$	2,76 – 4	InGaN + luminofor
Purpurová	Více typů	2,48 – 3,7	Dvojitá LED (červená a modrá)
Ultrafialová	$\lambda < 400$	3,1 - 4,4	AlN, AlGaInN, AlGaInN
Bílá	Celé spektrum	3,5	SiC/GaN + luminofor

Mezi další přednosti LED diod, oproti žárovkovým zdrojům používaným v automobilovém průmyslu, se řadí životnost, díky které mohou výrobci ušetřit na konstrukci světla, protože nebude nutné tento prvek nikdy měnit. Zapojení LED denních světel se podle předpisů provádí tak, že se světla zapínají automaticky po nastartování motoru. Pokud tedy budou LED při nastartování vozidla vždy aktivní, tak při průměrné rychlosti 60 km/h, může při obvyklé životnosti LED svítit až 6 milionů km. Což asi 12x převyšuje doporučenou životnost automobilu. Mimořádnou výhodou je samotný náběh LED diody do plného světelného výkonu, který je podstatně rychlejší oproti standardní žárovce. Tento rozdíl nepřekračuje více než 200ms, avšak z hlediska odezvy řidiče, např. na brzdová světla je rychlejší a tudíž může rychleji zareagovat. Dále pak z pohledu komunikace, kde je snaha dosáhnout co nejvyšších přenosových rychlostí, hraje tato skutečnost velmi významnou roli.

Hlavní nevýhodou používání LED je jejich teplotní závislost, která závisí na vlnové délce konkrétní barvy LED. S rostoucí teplotou klesá energetická účinnost světelných diod a tím i důležitý světelný tok. Tato závislost se nejvíce projevuje u žluté LED, naopak nižší pokles účinnosti vykazují modré LED. V automobilu jsou LED běžně vystaveny četným rozdílům teplot a z tohoto důvodu jsou všechny tyto prvky standardně měřeny 30 minut po připojení ovládacího prvku k napájení v teplotně kontrolované místnosti při teplotě okolí 25°C.



Pro zvolení LED k odpovídajícím funkcím v automobilu je důležité splnit několik aspektů. Nejdříve se musí vhodně zvolit barevná oblast, která je pro každou navrhovanou funkci přesně definovaná platnou normou. Dalším kritériem je optimální světelný výkon, který musí optický inženýr zvolit tak, aby splnil požadavek zákazníka a současně byla splněna právní norma. Z praxe je však známo, že světelný výkon ve všech případech převyšuje 100% požadovaného výkonu, který určuje norma. Nicméně je limitován hranicí, aby nedocházelo k plýtvání energie a oslnění protijedoucích vozidel. Následně se vhodně volí elektrické parametry pro přilehlou elektroniku.

### 1.1.2 OLED

Technologie LED vedla ke konstrukci organických LED diod OLED (Organic Light-Emitting Diode). V tomto případě je emitující vrstva materiálu LED organickou sloučeninou. Jsou to tedy LED diody, kde mezi anodou z průhledného materiálu a anodou z kovu nebo jiné průhledné látky, je několik vrstev organické látky. Společně s vodivými vrstvami jsou hermeticky vlisovány mezi tenké skleněné pláty nebo tenké vrstvy plastu. Kompletní sada světelných vrstev měří na výšku 400 nanometrů. Tyto vrstvy přenášejí elektrony a díry a spojují se ve vyzařovací vrstvě uprostřed. Při střetávání kladných a záporných elektrických nábojů, ve vyzařovací vrstvě vzniká světlo o velké intenzitě. Vyzařující materiál může být malá organická molekule v krystalické fázi, nebo polymer, který může být flexibilní. Tyto LED diody jsou známé jako PLED nebo FLED. Ve srovnání s běžnými LED, OLED jsou lehčí. Polymerní LED diody mohou mít navíc tu výhodu, že jsou flexibilní. Technologie umožňuje nanést OLED v mikroskopické vrstvě na průhlednou podložku, a to i ve velkých rozměrech, a vytvářet tak průhledná svítidla nejrůznějších tvarů. Tato mnohotvárnost OLED, spolu s vysokou energetickou účinností, je jejich hlavní předností. Hlavním nedostatkem OLED jsou jednak vyšší pořizovací náklady a jednak vlastnosti organických materiálů, jako přirozené stárnutí a malá odolnost vůči vyšším teplotám, které omezují životnost OLED svítidel. [11]

Implementaci OLED technologie do zadních světel, poprvé uskutečnil v prototypu výrobce BMW v modelu M4, pro směrovky i koncová světla, kde světlo vzniká ve velmi tenkých polovodičových vrstvách organického materiálu. V sériové výrobě by se měla technologie OLED prezentovat v modelu M2 v září roku 2015. Na rozdíl od LED, které disponují bodovým světlem, OLED vyzařují světlo relativně velkou plochou a toto světlo je na pohled extrémně homogenní. Díky tomu se diody OLED skvěle hodí pro vnější osvětlení, jež primárně plní funkci „být viděn“. Ovšem diody OLED konvenční LED nenahrazují, nýbrž je doplňují. Zpočátku budou diody OLED využívány jako zdroj světla zadních svítlen a společně s LED diodami, které najdou své uplatnění jako brzdová světla a směrové ukazatele, se stanou součástí takzvaného hybridního osvětlení. Dají se libovolně upravovat a tvarovat. Homogenní svítící OLED zdroje umožňují vytvářet zcela jasné, neobyčejné a přitom funkční designové prvky. Výsledkem jsou ostré světelné plochy o vysokém jasu, které jsou ještě zesíleny vějířovým uspořádáním jednotlivých prvků OLED. Tenké vrstvy OLED obsahují organické materiály, které jsou obklopeny plochými elektrodami sloužícími jako elektrické kontakty. Při průchodu proudu, vznikají v jednotlivých vrstvách fotony, které diody rozsvítí. Prvky OLED

samozřejmě splňují všechny požadované světelné hodnoty podle příslušných norem ECE (Economic Commission for Europe) a SAE (Society of Automotive Engineers).

Flexibilita při tvarování světelných OLED zdrojů dává volnost designérům pro jejich návrhy světel. Segmentace, tj. husté uspořádání světelných ploch, které se dají zapojit vedle sebe, dovoluje vytvoření 3D prostorového dojmu. Tím, že lze jednotlivé světelné OLED moduly ovládat samostatně, se dále otvírají dodatečné možnosti použití, jako např. realizace dynamických funkcí. Nepatrná instalační hloubka navíc umožňuje plastické uspořádání světelných ploch s minimálním nárokem na prostor. Segmenty OLED mohou svítit různým světlem podle režimu jízdy. To vše při minimální spotřebě energie, která je podobná energii z LED světelných zdrojů [35].



Obrázek 1.3: *Zadní světlo s technologií OLED vozidla BMW M4 [2]*

## 1.2 Technické normy v legislativě

Legislativa představuje právní řád, ve kterém musí být technické normy v souladu s Ústavou. Dopravní prostředky a jejich užívání je tedy podřízeno národní a obzvláště mezinárodní legislativě. V EU tyto požadavky určuje evropská hospodářská komise (EHK) a každý světlomet jako celek, i jeho jednotlivé funkce, musí splňovat technické normy v právních předpisech. EHK se zabývá kompletní problematikou automobilových vozidel i jejich součástí od roku 1958, kdy vznikly první předpisy, které rozdělují automobilové součásti na tři skupiny. Skupina zabývající se ochranou životního prostředí, pasivní ochranou a aktivní ochranou, kam spadá i předpis pro osvětlení automobilu. Skupina pro aktivní ochranu definuje normy stanovující základní parametry světlometů, tak aby bylo používání těchto prvků pro uživatele i jeho okolí co nejbezpečnější. Normy v této skupině především ukládají povinnost výrobcí zajistit maximální možné oslnění protijedoucího vozidla nebo aktivační dobu světlometu. Takto předepsané normy jsou však u výrobců brány jako nejnižší možný standard, ale samotné výrobky dosahují daleko vyšších kvalit, než ukládá předpis EHK [21].

Vlastnosti motorových vozidel, jejich součástí a příslušenství, které mohou ovlivnit bezpečnost silničního provozu, jsou v České republice regulovány zákonem č. 56/2001 Sb. ve znění pozdějších předpisů. Uvedené výrobky lze uvést na trh v České republice pouze poté, co jsou schváleny Ministerstvem dopravy. Ke schválení je nutno předložit osvědčení o homologaci vydané pověřenými laboratořemi, buď v České republice, nebo v zahraničí, které tvoří několik skupin. Skupina odborníků, skupina pro konstrukci vozidel a poslední skupina, která se zabývá bezpečnostní a vizuální realizací, také harmonizací a fotometrií světelného zdroje. Elektrotechnický zkušební ústav je laboratoř, která je pověřena Ministerstvem dopravy, k provádění homologačních zkoušek dle předpisů Evropské hospodářské komise, již od roku 1961. Homologované výrobky smí být označovány homologační značkou E v kroužku (pro Českou republiku je přidělena značka E8 udělovaná prostřednictvím EZÚ), která označuje stálou shodu vlastností výrobku s příslušnými homologačními ECE (EHK) předpisy. O stálosti shody se Ministerstvo dopravy prostřednictvím EZÚ přesvědčuje pravidelným prováděním zkoušek. V případě udělení homologace v České republice již není nutná další certifikace ani zkoušení v členských zemích systému i v řadě dalších. [7]

Pro každý druh osvětlovacího zařízení musí na viditelném místě existovat číselné schválení typu a symbol, který specifikuje danou normu. Celkový počet předpisů v ČR činí 36 v nekompletním rozmezí E1 - E118. Jako jsou např. předpisy:

- ECE 7 - obrysová, koncová a brzdová světla,
- ECE 91 - boční obrysové svítidly
- ECE 112 - asymetrické světlomety motorových vozidel,
- ECE 113 - symetrické světlomety motorových vozidel, a další.

### 1.3 CIE XYZ

Mezinárodní komise pro osvětlování CIE akceptovala v roce 1931 pět doporučení, která položila jako základ pro moderní měření barevnosti. Podle roku také známá jako CIE 1931, jejíž předností je, že doposud tvoří základ matematického a fyzikálního vyjádření barvy. Tato studie vychází z CIE RGB specifikace a je využita při analýze homogenity vyzařovaného optického záření obrysového a brzdového světla, v experimentálním měření v páté kapitole. Definice barev podle CIE 1931 se skládá podle X, Y, Z parametrů. Jas je vyjádřen hodnotou Y a barvy s tímto jasnem jsou uspořádány v chromatickém diagramu (x, y). Odstíny jsou rozloženy podél obvodu diagramu, sytost se za pohybu mění směrem k centrální neutrální oblasti. Barvy se stejným odstínem leží na přímce spojující bod na obvodu trojúhelníku a bod odpovídající bílé barvě. V tomto zobrazení není znázorněna světlost. Tyto odvozené parametry je možné dopočítat z trichromatických složek x, y a z, podle následujících vztahů, které jsou nazývány jako barevné souřadnice a jsou definovány takto:

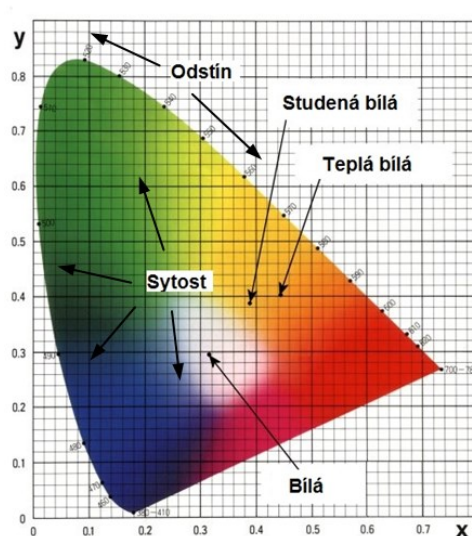
$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad (1.2)$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad (1.3)$$

$$z = \frac{Z}{X+Y+Z} \quad (1.4)$$

$$x + y + z = 1 \quad (1.5)$$

Výrobci při klasifikaci LED do barevných binů, uvádějí v katalogových listech souřadnice  $x$  a  $y$ , které se vztahují na barevný dvourozměrný prostor CIE  $xy$ , což je jednotkový trojúhelník XYZ promítnutý do roviny XY. Tento diagram chromatičnosti je možné vidět na obrázku (viz. obr 1.4).



Obrázek 1.4: Barevný prostor CIE 1931

Další hodnota v katalogové dokumentaci je světelný tok, což v CIE 1931 představuje parametr  $Y$ . Pro získání kompletních souřadnic  $Y$ ,  $X$  a  $Z$  parametrů uvedených v katalogové dokumentaci je možné využít následující vztahy:

$$X = x \frac{Y}{y} \quad (1.6)$$

$$Y = \phi \quad (1.7)$$

$$Z = \frac{Y}{y} (1 - x - y) \quad (1.8)$$

kde hodnoty  $x$ ,  $y$  představují souřadnice odpovídající vybranému bodu v barevném prostoru CIE 1931 (viz. obr. 1.4) a  $\phi$  prezentuje hodnotu světelného toku. Pro názornou ukázkou byla zvolena červená výkonová LED, která svými parametry odpovídá jedné z LED umístěné na základní desce zadního testovacího světla. Parametry této LED Osram červená (typ: APT LR G6SP) úhel svítivosti:  $120^\circ$ , světelný tok  $\phi = 17,8$  cd (56 lm), vlnová délka: 623 nm, CIE souřadnice:  $x=0,638$ ,  $y=0,33$ . Hodnoty  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  budou podle rovnic (viz. 1.6 – 1.8) následující:

$$X = 0,638 \frac{56}{0,33} = 108,27$$

$$Y = 56$$

$$Z = \frac{56}{0,33} (1 - 0,638 - 0,33) = 5,43$$

Převod těchto katalogových parametrů na parametry normy CIE 1931 je z hlediska kombinace několika LED z různých barevných binů velmi důležité. Většina mezinárodních norem, které pojednávají o zdrojích světla pro automobilový průmysl, používají při definování barev zdrojů, právě normu CIE 1931, avšak odvolávají se pouze na barevné souřadnice  $x$  a  $y$  [9].

## 1.4 Sběrnice

Veškerá elektronická zařízení, která se v automobilech vyskytují, je nutné mezi sebou navzájem propojit, tak aby byla jejich součinnost co nejrychlejší a nejefektivnější. Signály, které jednotlivá zařízení vydávají, se pomocí sběrnic dostávají do centrální řídicí jednotky, která signály vyhodnocuje a přiděluje jim prioritu podle závažnosti a důležitosti probíhajících situací. S vývojem automobilových komponentů v autech se zvyšuje délka kabeláže i nároky na její funkčnost. Rozlišujeme několik druhů, které můžeme využít na problematiku komunikace mezi automobily pomocí LED technologie. Tento nový druh komunikace se může rozdělovat na jednoduchou komunikaci, která bude využívat základní znaky či symboly pro sdělení informace. Pro takto primitivní komunikaci bude stačit úzké přenosové pásmo nebo se může přenášet větší objem dat, a proto bude důležité zajistit přenosovou rychlost několikanásobně vyšší. Pro tyto přenosy můžeme využít některou z následujících sběrnic.

### 1.4.1 CAN

První sběrnici vyvinutou firmou Bosch v roce 1980 je CAN-BUS. Poprvé byla použita v roce 1991 v automobilu Mercedes Benz třídy S. Tento systém byl vyvinutý pro komunikaci mezi jednotlivými řídicími jednotkami, které jsou napojeny na centrální řídicí systém. Princip je takový, že každá zpráva dostane identifikátor, který kromě samotného obsahu dat rozhoduje i o přednosti sdělení. Tato priorita je určena z bezpečnostního významu i z rychlosti změny obsahu. Tyto data se doručují všem jednotkám, které sami rozhodnou zda je akceptují. Výhoda

CAN (Controller Area Network) sběrnice je taková, že zvyšuje spolehlivost přenosu a umožňuje jednotkám data přijímat i odesílat. Podle rychlosti přenosu, která dosahuje až 1Mbps, lze sběrnici CAN rozdělit na hlavní 3 typy:

- HSCAN (Dual-wire, High Speed CAN) – vysokorychlostní sběrnice: 1 Mbps,
- MSCAN (Dual-wire, Medium Speed CAN) – středně rychlostní sběrnice: 500 kbps,
- LSCAN (Single-wire, Low Speed CAN) – nízko rychlostní sběrnice - 33.3 kbps.

### 1.4.2 LIN

Tento typ sběrnice byl vyvinut jako doplněk sběrnice CAN v roce 1999, za účelem snížení ceny a sdružení několika významných firem. Aplikování této sběrnice se využívá u funkcí automobilu, kde není potřebný vysokorychlostní přenos, jako je řízení dveří, oken, zámků, stěračů a klimatizace. Maximální rychlost komunikace se pohybuje na 19,2 kbit/s, avšak jedná se o maximální hranici, protože opět tento standard doporučuje 3 přenosové rychlosti. Z důvodu takto nízké přenosové rychlosti by tento standard nebyl vhodný pro připojení zadního světla a pro následnou komunikaci mezi vozidly, protože by tak nebyl využit celkový potenciál, který dokáže světlo modulovat [10].

### 1.4.3 MOST

Sběrnice MOST (Media Oriented System Transport) byla navržena pro multimediální přenosy v automobilu. Elektronické systémy, které takto spolupracují s multimédií, mají kvůli velkým objemům dat, větší náročnost na rychlost, která dosahuje až 24,5 Mbps. Pomocí optické sítě je tedy možné přenášet video i audio signály nebo mohou zprostředkovat připojení k internetu.

### 1.4.4 FlexRay

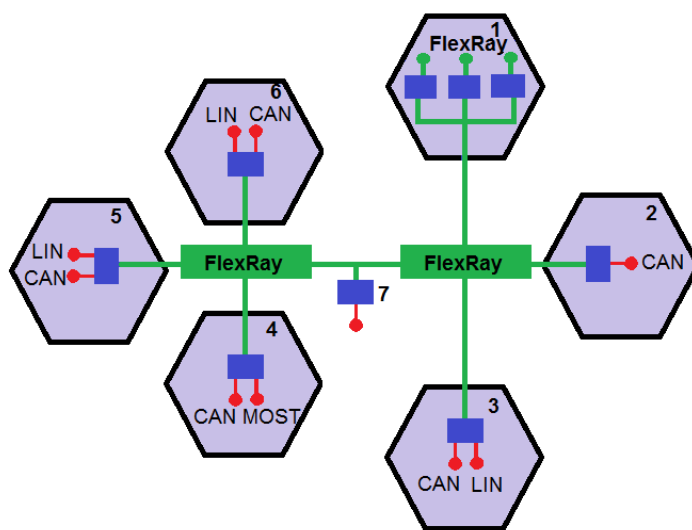
Nejnovější standard FlexRay (Flexible Ray - flexibilní paprsek), je společným konsorciem předních výrobců automobilů. Tento standard má navýšit propustnost sběrnice z důvodu neustálého zvyšování kvality služeb. Tato skutečnost sebou nese i požadavek nárůstu přenosové rychlosti, proto bylo nezbytné nahradit sběrnice typu CAN a LIN (Local Interconnect Network) technologií, která bude srovnatelná s Ethernetem a bude tak možné přenášet data několikanásobně rychleji. Další výhodou je vyšší odolnost proti geomagnetickému rušení, dvoukanálová struktura, velmi dobrá ochrana přenášených dat a zároveň statický i dynamický přístup na sběrnici. Pro FlexRay komunikaci a přístup na sběrnici je však nutné vytvořit konkrétní hardwarově-sofwarové rozhraní, tzv. uzel, který propojuje nadřazený systém (CPU) s vodiči sběrnice. Ty jsou však dnes již výrobci, jako je například Freescale, nabízeny v podobě různých integrovaných obvodů. Hlavním a typickým vývojářem protokolu FlexRay je již několik let automobilka BMW, která jej postupně nasazuje do nově vyvíjených a vyráběných automobilů všech řad. Tato automobilka je také jedním z lídrů vývoje v konsorciu. FlexRay však není využíván na všech úrovních datového přenosu v automobilech, ale je vhodně doplňován již dlouho používanými standardy CAN a LIN. FlexRay je díky svým vlastnostem využíván jako hlavní páteřní síť, zatímco CAN a LIN vytváří propojení s méně náročnými

částmi systému. Příklad takto realizované topologie (viz. obr. 1.5), kde mohou být jednotlivé prvky zapojeny následovně: 1 – jízdní dynamika, 2 – podpora řidiče, 3 – hnací ústrojí, 4 – zábavní systémy, 5 – karoserie, 6 – pasivní bezpečnost, 7 – centrální přístupový bod vozidla. K realizaci komunikace jsou v praxi využívány buď speciální verze mikroprocesorů a mikrokontrolérů, určené právě pro automobilový průmysl, které již FlexRay mají implementován, nebo pro kterýkoliv jiný procesor lze použít speciální integrované FlexRay řadiče.

Tato sběrnice byla navržena pro systémy řízení (Steer-by-Wire), akcelerace a brzdění (Brake-by-Wire), pro které se používá jednotné označení „X-by Wire“. Například u brzdění je hydraulický přenos mezi pedálem a brzdou nahrazen elektrickými kabely. Vzhledem k využití této sběrnice se předpokládá přesné řízení, časování a ochrana před všemi možnými typy chyb, které mohou nastat a je tedy vhodná pro kritické aplikace z hlediska bezpečnosti, jako jsou právě brzdové systémy. V budoucnu by se měla stát standardem pro veškeré automobily.

U FlexRay sběrnice je možné mít v jednom clusteru několik různých typů topologií. Může být nakonfigurována jako jednokanálová, dvoukanálová sběrnice, síť typu hvězda nebo další hybridní kombinace těchto uvedených struktur. Celková možná délka, která zaručuje správnou funkci, je dána těmito parametry:

- maximální zpoždění přenosu 2.4 mikrosekund,
- maximální vzdálenost mezi uzly/komunikačními stanicemi 24 m,
- maximálně 3 vzájemně propojené aktivní hvězdy.

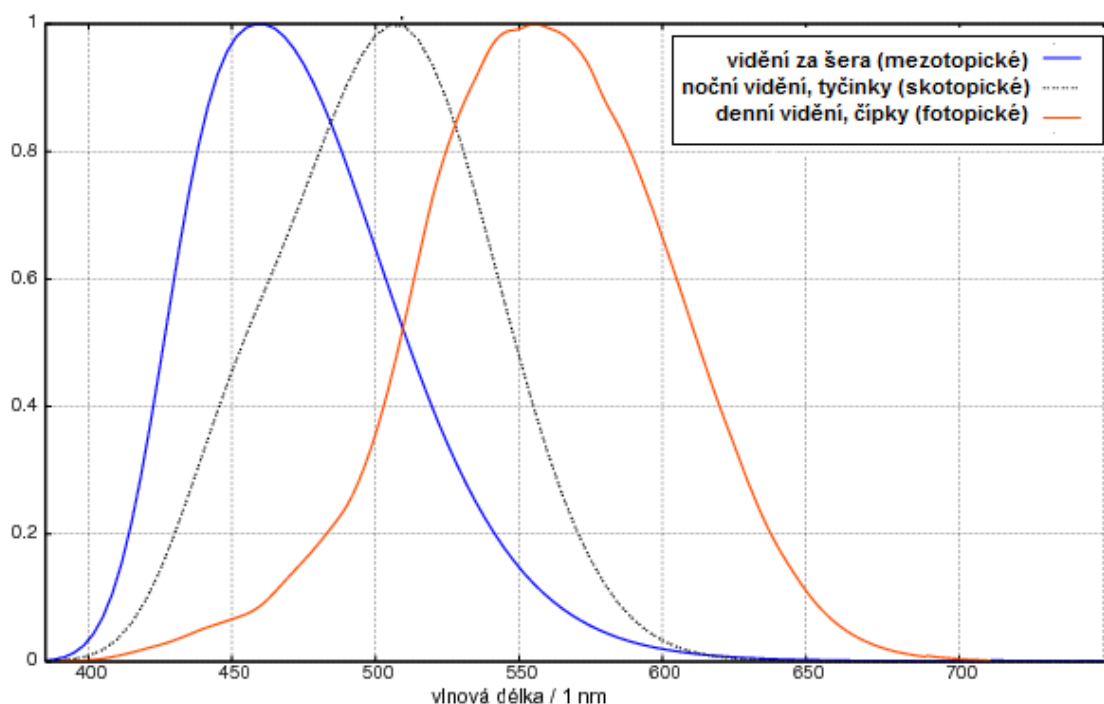


Obrázek 1.5: Ukázka propojení jednotlivých typů sběrnic ve vozidle

Výměna zpráv je založena na deterministickém komunikačním cyklu a synchronizace komunikace je maximálně strukturována a její princip spočívá na společném taktování pro všechny uzly a komponenty sběrnice [36].

## 2 Parametry LED používaných v automobilovém průmyslu

Světelné zdroje musí v automobilovém průmyslu splňovat hned několik parametrů, tak aby byly světelně technické veličiny pro lidský zrak co nejlepší. Pro proces vidění není podstatná energie ze světelného zdroje za určitý čas, ale důležitý je výkon, tedy prostorové rozložení zářivého toku zdroje. Kvalita osvětlení se na základě těchto zákonitostí posuzuje podle míry osvětlení, které napomáhá průběhu přijetí a zpracování informace přenášené světlem, dále pak v jaké míře usnadňuje proces a vznik zrakového vjemu. Z této příčiny se ve světelné technice posuzují fotometrické veličiny, které respektují citlivost oka pozorovatele k záření různých vlnových délek. Jelikož zrakový orgán je odlišně citlivý na záření různých vlnových délek, tak jsou průběhy a hranice viditelnosti u různých osob odlišné. Aby se zajistila jednotnost světelně technických výpočtů, přijala Mezinárodní komise pro osvětlování (CIE), dohodu o hodnotách spektrální citlivosti tzv. normálního fotometrického pozorovatele (viz. obr. 2.1).



Obrázek 2.1: Poměrná spektrální citlivost oka normálního fotometrického pozorovatele

Druhou vlastností pro analýzu světelných zdrojů jsou elektrické veličiny. Mezi tyto veličiny patří normalizovaný proud, normalizované napětí a příkon nebo výkon světelného zdroje. Z důvodu velkého množství akumulace tepelné energie ve světelné soustavě je pak nezbytné dbát i na teplotní závislost, která je důležitá pro intenzitu světelného zdroje.



## 2.1 Elektrické vlastnosti

V katalogových listech každého světelného zdroje, výrobce uvádí specifické parametry, podle kterých je vhodné elektronický obvod světla přizpůsobit a dodržovat tak maximální únosnou hranici, pro kterou byl prvek navržen, aby nedošlo k destrukci. Světelné zdroje LED, které jsou cílem výzkumu, mají nespornou výhodu v energetické úspoře, takový zdroj je projektován pro napětí 1,63 - 4,4 podle barvy (viz. tab. 1.1). Tyto zdroje pak podle typu produkují přibližně od 20lm/W do 200lm/W.

Pro náš výzkum, který se zabývá komunikací mezi vozidly, bude jako zdroj komunikace brána soustava LED. Elektronické vlastnosti této soustavy budou podstatné, pro co nejlepši určení pracovního bodu na kterém bude komunikace probíhat.

### 2.1.1 Převodová charakteristika

Výhodou polovodičových LED je lineární (hlavně hranově vyzářující LED) závislost výstupního optického výkonu  $P$ , na proudu  $I$ , procházejícím LED. Vzorec popisující kvantovou účinnost  $\eta$ , respektive závislost velikosti optického výkonu na procházejícím proudu má následující tvar:

$$P = \frac{\eta h \nu I}{e} \quad (2.2)$$

kde  $P$  je výstupní optický výkon LED,  $\eta$  je kvantová účinnost,  $h$  je Planckova konstanta,  $\nu$  je frekvence,  $I$  je proud procházející LED a  $e$  je elementární náboj.

Výše uvedená kvantová účinnost je závislá na geometrické konstrukci LED. Vnitřní kvantová účinnost (poměr počtu fotonů na počet zanikajících volných elektronů) obvykle dosahuje 100 %. Tvar  $P/I$  charakteristiky je závislý na teplotě okolí. Pro optimální výsledky měření je vždy důležité uvést teplotu okolí v době měření [14].

### 2.1.2 Volt-ampérová charakteristika

Chování diody popisuje voltampérová charakteristika, tedy závislost protékajícího proudu  $I_F$  na přiloženém napětí  $U_F$ . Průběh charakteristiky ovlivňují jednotlivé typy LED, geometrie, vlastnosti P-N přechodu, použitý materiál, výrobní technologie. Při praktickém používání diody jsou důležité tyto parametry:

- Prahové napětí, což je napětí, které je třeba přiložit na diodu, aby došlo k jejímu otevření tj. aby jí mohl protékat proud. Toto napětí závisí na materiálu, např. u křemíku je 0,51 V, germania 0,28 V, u LED může dosahovat i 3 V.
- Maximální proud v propustném směru je maximální proud, který může diodou procházet bez jejího zničení v důsledku přehřátí. U LED diod se také uvádí

maximální krátkodobý proud, který je několika násobně vyšší než proud jmenovitý. Maximální doba trvání této špičky je uvedena v technické dokumentaci LED diody.

Při zahřívání LED dochází ke změně V-I charakteristiky. Zvyšování teploty způsobuje téměř lineární pokles napětí [1].

## 2.2 Fotometrické vlastnosti

Samotná definice fotometrie spočívá v měření světla, které je detekováno lidským okem. Spojení lidského oka s okolím, zprostředkované světlem, je zrakovým aparátem vyhodnocován ze dvou primárních signálů. Signál o jasové a barevné (vlnová délka) složce. Zrakové receptory registrují rozsah vlnových délek v rozmezí 380 nm - 780 nm (viz. obr. 2.1). Podrobněji si rozebereme tedy veličiny, které popisují světlo a jeho účinky na lidské oko [32].

### 2.2.1 Jas

Technická veličina, konkrétně jas světelných paprsků, na kterou zrakový orgán okamžitě reaguje. Tato veličina je určena prostorovou a plošnou hustotou světelného toku přenášeného paprsky podle vztahu:

$$L_{OP} = \frac{d^2\Phi}{d\Omega_1 dA_n} \quad (cd \cdot m^{-2}; lm; sr, m^2) \quad (2.2)$$

kde jednotlivé parametry vyjadřují:

- $L_{OP}$  jas svazku paprsků ve směru osy optického svazku,
- $d\Omega$  prostorový úhel, ve kterém se paprsky šíří,
- $dA_n$  je ploška kolmá k ose svazku paprsků, na níž se provádí plošná hustota světelného toku.

Světelný tok přenášený svazkem světelných paprsků od bodu k bodu, po nejmenší možné dráze se uměrně mění se změnou světelného toku a mění se i jas paprsku, a to vlivem prostředí, které může světlo pohlcovat, vyzařovat nebo rozptylovat.

Pokud vymežíme svazek paprsků dvěma otvory, které budou mít velikost plochy  $dA_1$  a  $dA_2$  v libovolně zvolených místech na stínítkách  $A_1$  a  $A_2$  vyplývají z rovnice (viz. 2.2) tyto vztahy:

- Pro jas  $L_{OP}$  svazku paprsků sbíhajících se v prostorovém úhlu  $d\Omega_1 = dA_1 \cos \gamma \text{ l}^{-2}$  z plošky  $dA_1$  do bodu P. Tedy od zdroje ve směru fotonky nebo oka pozorovatele.

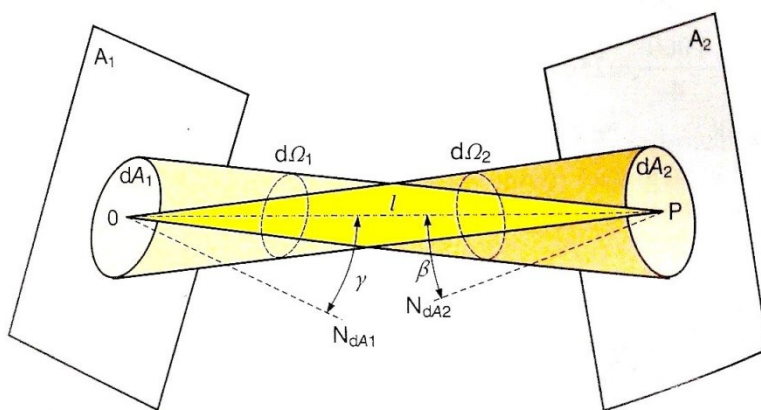
$$L_{OP} = \frac{d^2\Phi}{d\Omega_1 dA_2 \cos\beta} = \frac{dE_N}{d\Omega_1} \quad (cd \cdot m^{-2}; lm; sr, m^2; lx, sr) \quad (2.3)$$

kde  $dE_N$  značí normálovou osvětlenost, což je intenzita průmětu plošky  $dA_2$  do roviny kolmé k paprsku  $l$ .

- Pro jas  $L_{OP} = L_\gamma$  svazku paprsků rozbíhajících se v prostorovém úhlu  $d\Omega_2 = dA_2 \cos \beta$   $l^2$  z bodu  $O$

$$L_{OP} = L_\gamma \frac{d^2\Phi}{d\Omega_2 dA_1 \cos\gamma} = \frac{dI_\gamma}{dA_1 \cos\gamma} \quad (cd \cdot m^{-2}; lm, m^2, sr; cd, m^2) \quad (2.4)$$

kde  $dI_\gamma = d\Phi/d\Omega_2$  je svítivost plošky  $dA_1$  ve směru pod úhlem  $\gamma$  od normály  $N_{dA1}$ .



Obrázek 2.2: Vymezení svazku sbíhavých a rozbíhavých paprsků [32]

V homogenním, nerozptylujícím a nepohlcujícím prostředí je jas svazku paprsků na celé jeho dráze stejný, a tedy nezávislý na vzdálenosti od světelného zdroje. Jednotkou jasu je kandela na čtvereční metr [32].

## 2.2.2 Světelný tok

Tato světelně technická veličina odpovídá zářivému toku a vyjadřuje způsobnost zářivého toku vyvolat zrakový počitek. Jednotkou světelného toku je jeden lumen. Světelný tok označovaný jako  $\Phi$  monochromatického záření vlnové délky  $\alpha$ , jehož zářivý tok je  $\Phi_e$  je definovaný vztahem:

$$\Phi(\gamma) = K(\gamma)\Phi_e(\gamma) = K_m V(\gamma)\Phi_e(\gamma) \quad (lm; lm \cdot W^{-1}, -, W) \quad (2.5)$$

Velichina  $K(\gamma)$  ( $lm \cdot W^{-1}$ ) vyjadřuje světelný účinek monochromatického záření rovný poměru světelného toku a jemu odpovídajícího zářivého toku. Většinou se velichina  $K(\gamma)$

vyjadřuje součinem poměrů účinností  $V(\gamma)$  monochromatického záření a součinem maximální hodnoty  $K_m$  spektrálního průběhu veličiny  $K(\gamma)$  podle vztahu:

$$K(\gamma) = K_m V(\gamma) \quad (2.6)$$

$V(\gamma)$  je poměrná světelná účinnost monochromatického záření definovaná vztahem

$$V(\gamma) = \frac{K(\gamma)}{K_m} \quad (-; lm \cdot W^{-1}, lm \cdot W^{-1}) \quad (2.7)$$

Z pozice individuálního pozorovatele je veličina  $V(\gamma)$  stejná s poměrnou spektrální citlivostí pozorovatele. V základní soustavě SI se jednotky světelně technických veličin odvozují od základní jednotky svítivosti (jedna kandela), tj. od svítivosti zdroje záření o frekvenci 540 THz, při zářivosti zdroje v daném směru  $1/683 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$  [32].

### 2.2.3 Intenzita

Osvětlenost, neboli intenzita osvětlení  $E$ , rovinné plošky  $dA$ , vyjadřuje světelný tok, který dopadá na osvětlovanou plochu. Z definice plyne, že plošná hustota světelného toku  $d\Phi_d$ , dopadající na plošku  $dA$ , je dána vztahem:

$$E = \frac{d\Phi_d}{dA} \quad (lx; lm, m^2) \quad (2.8)$$

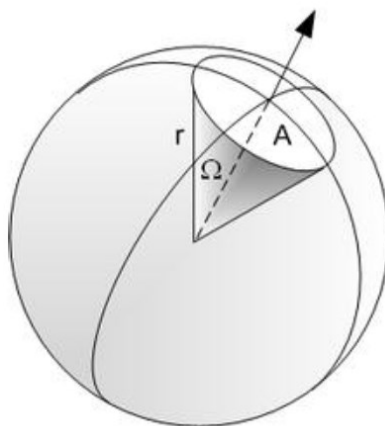
Osvětlenost plošky  $dA$  se také nazývá i osvětleností v bodě, jehož elementární okolí v uvažované rovině vytváří ploška  $dA$ . Jednotkou osvětlenosti je jeden lux (lx).

V praxi je to důležitý parametr, který si zákazník prosazuje v zadání při požadavku na výrobu světla. Tato veličina se také měří jako limit pro homologaci. V podstatě u větších světlometů může být pro splnění limitu intenzity jas nižší, než u světlometů malé velikosti [32].

### 2.2.4 Prostorový úhel

Část prostoru ohraničená rotační kuželovou plochou. Vyjadřuje poměr mezi plochou vytyčenou kuželem na povrchu koule ( $A$ ) ke kvadrátu poloměru dané koule ( $r$ ). Tento poměr je pro daný kužel neměnný (zmenší se poloměr, zmenší se i vytyčená plocha). Jednotkou je steradián a označuje se řeckým písmenem Omega.

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad [sr] \quad (2.9)$$



Obrázek 2.3: Definice prostorového úhlu [32]

### 2.2.5 Svítivost

Analogická veličina k zářivosti, označuje se jako  $I$  a jednotkou je jedna kandela. Zařazuje se mezi základní jednotky soustavy SI. Je definována jako svítivost monochromatického záření o frekvenci  $540 \cdot 10^{12}$  Hz (vlnová délka 555,2 nm) a zářivosti 1,46 mW. Vztah pro výpočet svítivosti [32].

$$I = K \int_0^\infty \hat{I}_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (2.10)$$

### 2.2.6 Světlo technické vlastnosti materiálu

Pro návrh a konstrukci světelně činných a odrazových dílů zařízení s ohledem na možnosti usměrnění světelného toku, jsou optické vlastnosti materiálů důležité. Mají významný vliv na rozptyl a omezení jasů v konkrétních směrech, a to při zachování co nejvyšší účinnosti svítivosti.

Odrážnosti jednotlivých prvků v automobilovém světle mají podstatný vliv na kvantitativní i na kvalitativní ukazatele osvětlení a ekonomičnost osvětlovacího zařízení. Světelný tok  $\Phi$  dopadající na vhodnou hmotu se v obecném případě dělí na tři části, tedy na část  $\Phi_\Omega$ , která se odrazí, na část  $\Phi_\tau$ , která hmotou projde a na část  $\Phi_\alpha$ , kterou látka pohltí. Platí tedy vztah:

$$\Phi = \Phi_\rho + \Phi_\tau + \Phi_\alpha \quad (lm; lm, lm, lm) \quad (2.11)$$

Světelné technické vlastnosti látek charakterizují tři integrální činitele odpovídající zmíněnému rozdělení světelného toku a charakterizují vlastnosti sledované látky z hlediska záření různých vlnových délek souhrnně (integrálně), a to:

- integrální činitel odrazu  $\rho = \Phi_{\rho} / \Phi$ ,
- integrální činitel prostupu  $\tau = \Phi_{\tau} / \Phi$ ,
- integrální činitel pohlcení  $\alpha = \Phi_{\alpha} / \Phi$ .

Pro činitele  $\rho$ ,  $\tau$ ,  $\alpha$  vyplývá z rovnice (viz 1.1), známá souvislost:

$$\rho + \tau + \alpha = 1 \quad (2.12)$$

Pro neprůsvitné materiály pak platí  $\rho + \alpha = 1$  a pro materiály pohlcující veškeré záření na ně dopadající (absolutně černé těleso)  $\alpha = 1$ .

O prostředí, kterým se šíří světelné paprsky od svítidel na osvětlované plochy, se při praktických výpočtech obvykle předpokládá, že je nerozptylující a nepohlcující ( $\tau = 1$ ). Činitelé odrazu, prostupu a pohlcení nezávisí pouze na vlastnostech látky samotné, ale i na vlnové délce dopadajícího záření. Proto se kromě integrálních hodnot zmíněných činitelů definují i jejich spektrální hodnoty  $\rho(\lambda)$ ,  $\tau(\lambda)$ ,  $\alpha(\lambda)$ .

Orientační hodnoty integrálních činitelů  $\rho$ ,  $\tau$ ,  $\alpha$  materiálů používaných v osvětlovacích prvcích v automobilovém průmyslu jsou uvedeny v tabulce (viz. tab. 2.1) [32].

Tabulka 2.1: *Přibližné hodnoty materiálových činitelů [32]*

Materiál	činitel (%)		
	odrazu $\rho$	prostupu $\tau$	pohlcení $\alpha$
sklo čiré (tloušťka 2 až 4 mm)	6 – 8	90 – 92	2 - 4
sklo matované leptané (tl. 2 až 3 mm)	6 – 11	75 – 91	3 - 19
sklo opálové bílé (tl. 2 až 3 mm)	29 – 52	36 – 66	3 – 10
sklo opalizované (tl. 2 až 3 mm)	13 – 18	59 – 84	3 - 13
leštěný hliník	60 – 72	-	-

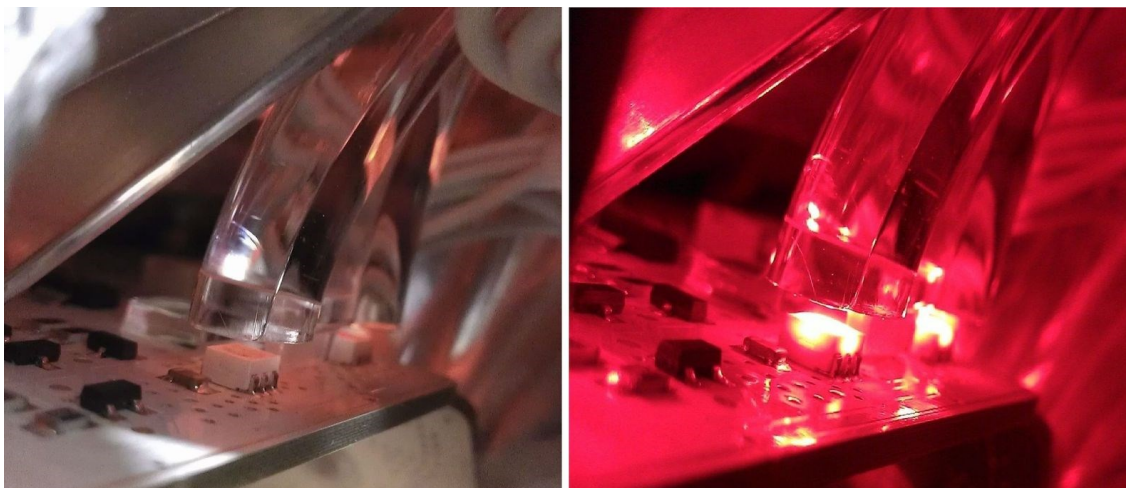
### 3 Optický světlovod

Při konstrukci některých fyzikálních přístrojů jsme postaveni před úlohu převést světlo z jednoho místa na druhé s co nejmenšími ztrátami. Součástíka, která má plnit tuto úlohu, se nazývá světlovod. Světlovod je optický prvek, který využívá odrazu světla a umožňuje pomocí odrazu paprsků šířit světlo vně zakřiveného materiálu, ze kterého je vyroben. Sestrojení prvního světlovodu se datuje asi v polovině 20. století, ale uplatnění v praxi dosáhl až o několik desítek let později. V samotných počátcích byl konstruován jako tubus pokryt extrémně reflexním materiálem, který vedl denní nebo umělé světlo do požadovaného prostoru. S postupem času byl světlovod minimalizován, aby mohl být využit v dalších odvětvích průmyslu, kde může být vyroben jako výlisek, přenášející světlo ze zdroje, který je tvořen jednou nebo soustavou LED. Tento směr rozvoje světlovodů vytváří mnoho variant využití, kde jednou z nich je osvětlení v automobilovém průmyslu, kterým se budeme nadále zabývat. Nemalou část světlovodů tvoří samotné optické vlákno, které je základním stavebním prvkem optických přístupových sítí.

Světlovod si je možné představit jako trubici určitého transparentního materiálu s maximálně možným indexem lomu. Transparentnost v optice vyjadřuje průhlednost. Tento materiál je tedy takový, který propouští světlo nebo jakékoliv jiné elektromagnetické záření za co nejmenších ztrát a zkreslení. U paprsků, které přecházejí z jednoho transparentního prostředí do jiného, dochází k lomu světla, který je vyjádřen indexem lomu. Základním transparentním materiálem je sklo, které může být nahrazeno i umělou hmotou, což má za následek větší odolnost a cenovou dostupnost v důsledku zhoršení vodivosti paprsku. Takový světlovod je tvarován do různě specifických profilů podle potřeby zákazníka. Do takto připraveného světlovodu je z jednoho nebo více zdrojů vpouštěno světlo, které se pomocí vhodně navržených optických prvků vyvazuje do požadovaného směru (viz. obr. 3.1). Plocha, přes kterou vniká světlo do světlovodu, se nazývá čelo světlovodu. Světlovod musí zaručit, aby se co nejvíce světla, které projde čelem, dostalo až na druhý konec světlovodu. [1] Symbolem  $J_0$  označíme množství světla procházejícího čelem světlovodu a symbolem  $J$  množství světla na konci, platí podle vzorce (2.1)

$$J = J_0 e^{-kx} \quad (3.1)$$

Kde  $x$  je délka světlovodu a  $k$  je koeficient absorpce světla. Z rovnice (viz. 3.1) plyne, že absorpce světla roste s délkou světlovodu exponenciálně. Aby se docílilo co nejnížší ztráty světla, musí se světlovod vyrobit tak, aby byl co nejkratší a z materiálu, u kterého je absorpce světla v pásmu propustného záření zanedbatelně malá.



Obrázek 3.1: Ukázka spojení LED a světlovodu u zadního světla Octavia III.

### 3.1 Tvar světlovodu

Jeden z nejdůležitějších faktorů, proč se světlovody začaly hojně aplikovat v automobilovém průmyslu je ten, že dávají prostor pro mnoho tvarů a ty přispívají k výjimečným a přitažlivým faceliftům automobilu. Pro ukázkou jsem zvolil produkty společnosti Varroc Lighting Systems (viz. obr. 3.2), která využila světlovody hned u několika modelů. Plně ledkovými zadními svítilnami s masivními světlovody disponuje Jaguar typu XF. U značky Citroen DS3 se světlovod využívá pro efekt nekonečného zrcadlení, vytvářející 3D efekt. Originální futuristická zadní světla ve tvaru bumerangu se třemi zářícími „drápy“, které dokonale splývají s karoserií vozu, se chlubí model automobilu Peugeot 208. A u svítilny automobilové značky Ford Focus má dokonce tato společnost patent v řešení světlovodů [24].

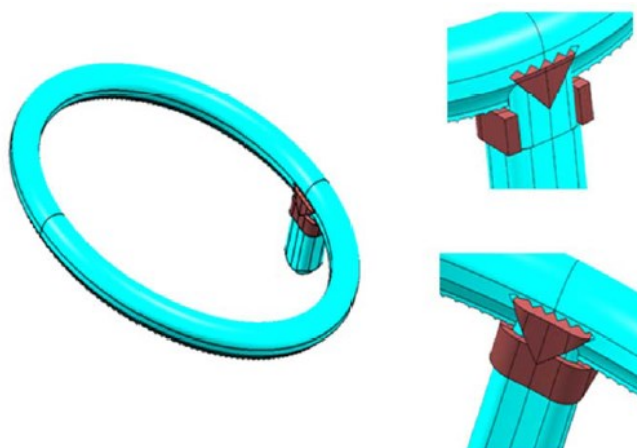


Obrázek 3.2: Zadní svítilny od firmy Varroc, Jaguar XF (vlevo nahoře), Citroen DS3 (vpravo nahoře), Ford Focus (vlevo dole), Peugeot 208 (vpravo dole) [24]



Světlovody jsou většinou navrženy jako linie sloužící k nasvícení význačné kontury, která může být částečně uzavřena s cílem obepínat komoru reflektoru. Pro tyto lineární typy světlovodů je napájení světlem řešeno tak, že světlovod na svém konci obsahuje optický element, ke kterému se umístí zdroj světla. Současný stav technologie tedy umožňuje mít otevřený tvar světlovodů, tj. takový, který neobepíná celou komoru, a pro který je nutné stanovit místo na světlovodu, kde bude umístěn světelný zdroj napájející světlovod. Toto místo je pak nutné překrýt částí masky světla nebo jinou přídatnou krytkou tak, aby nevznikalo místo s výrazně vyšším jasnem způsobené nežádoucím světlem ze světelného zdroje.

Novým řešením, jak se vyhnout přesvětlenému místu v prvotní části světlovodu a docílit tak homogenního vzhledu, je uzavřený kruhový světlovod. Uzavřený světlovod znamená, že neexistuje plocha, odkud by docházelo k přímému navázání světla ze zdroje. LED je v tomto řešení umístěna za světlovodem a součástí kruhové části je světelný přivaděč, na jehož vstupu je umístěn kolimátor světla vytvářející kolimovaný svazek světla ze světelného zdroje. Ten je zakončený dutinou, která tvoří totálně odrazový hranol a posílá světlo do těla světlovodů. Jak světelný přivaděč, tak světlovod, tvoří jednu nedílnou část ze stejného materiálu. Otvor ve světlovodu, který tvoří totálně odrazný hranol, způsobuje vzhledovou nehomogenitu v zhasnutém i v rozsvíceném stavu, kdy částí světlovodu stále prochází parazitní světlo a vytváří se místo se zvýšeným jasnem.

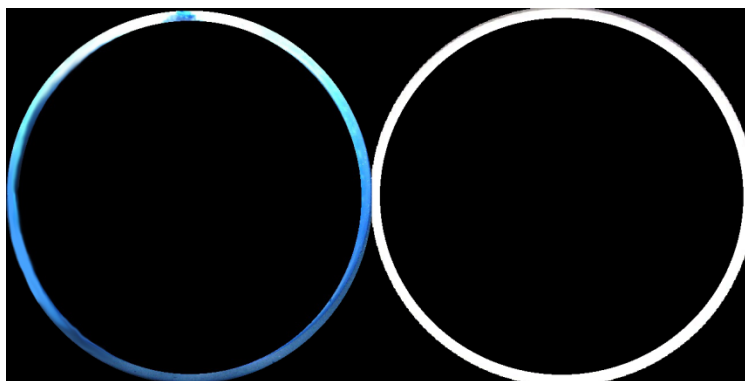


Obrázek 3.3: Znáznornění uzavřeného světlovodu, vložky vyplňující dutinu TIR hranolu[33]

Vzhledová homogenita v nerozsvíceném stavu je zajištěna jemnými optickými hranoly na výstupní ploše odrazného hranolu. Délka optických hranolů je rovna průměru válcové čočky, tvořící výstupní plochu světla z těla světlovodu. Válcová čočka virtuálně roztáhne vyvazující optické elementy umístěné na spodní straně těla světlovodu. Optické hranoly jsou potom navrženy tak, aby navazovaly na vyvazující optické elementy a aby světlovod jako celek měl v nerozsvíceném stavu homogenní vzhled.

Pro odstranění parazitního světla, které je příčinou vzniku jasného bodu v blízkosti světelného zdroje se používá plastová vložka, vyrobená kombinací opticky transparentního

a kouřového materiálu. Podle poměru těchto dvou materiálů se reguluje absorpce světla v samotné vložce. Tímto způsobem se dosahuje řízené redukce energie procházejícího světla a potlačení místa se zvýšeným jasnem. Aby nedocházelo k naopak tmavým místům, musí být intenzita sladěna přesně na hodnoty intenzity světla, vyzařujícího zbylou částí světlovodu.



Obrázek 3.4: *Porovnání lineárního světlovodu (vlevo) a uzavřeného světlovodu (vpravo)*

Tvar průřezu světlovodu musí být ovšem zvolen tak, aby všechny světelné paprsky, které projdou čelem, neunikly v průběhu trasy mimo efektivní oblast světlovodu, ale dostaly se až na konec nebo na potřebnou část v definované části prvku. Světelné paprsky, které procházejí libovolným místem čela, dopadají na rozhraní světlovodu a obklopeného prostředí, pod takovým úhlem, že v každém místě rozhraní nastane totální odraz paprsku dovnitř světlovodu.

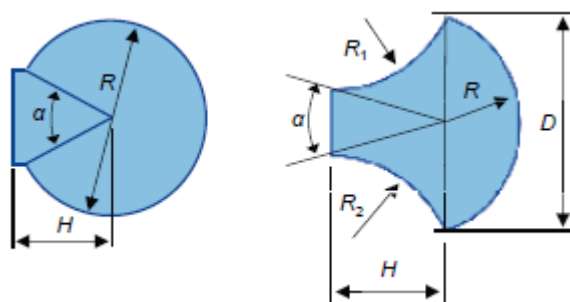


Obrázek 3.5: *Světlovody použité ve světlech Audi TT [4]*



Obrázek 3.6: Světlovody použité ve světlech Cadillac CTS (vlevo) a Škoda Superb (vpravo) [4]

Tento parametr značně ovlivňuje konečnou distribuci světla a současně má i značný vliv na stejnoměrné rozptřeni světla podél světlovodu. Pro světlovody se v praxi nejčastěji používá profil ve tvaru kruhu, který je v poslední době nahrazován dalšími rozmanitými typy profilů, jakou je tvar hříbku (viz. obr. 3.7), obdélníku, elipsy nebo libovolného profilu (tzv. FreeForm profile), kde je tvar profilu v různých částech trasy různorodý. Výhodou hříbového profilu je snazší možnost nastavit rozptyl světla v ose, která je kolmá na světlovod, který je řízen hodnotou rádiusu výstupní válcové čočky světlovodu.



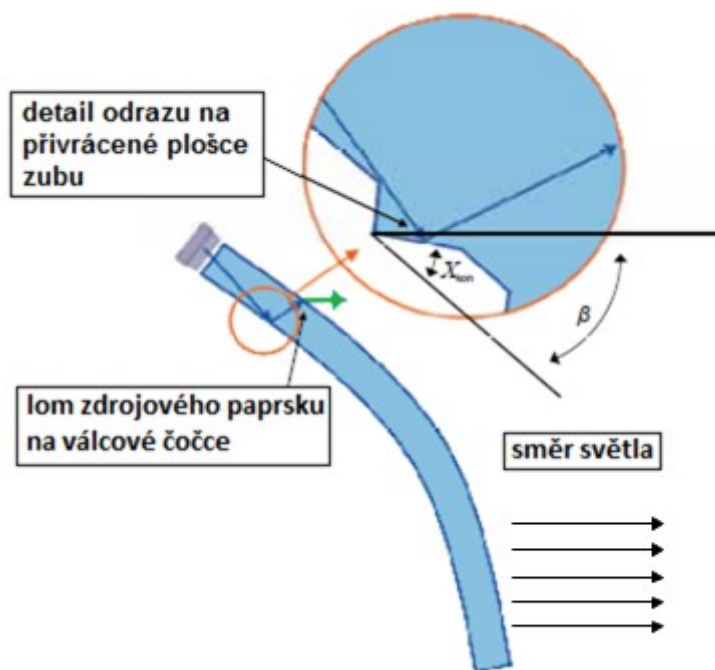
Obrázek 3.7: Kruhový tvar a tvar hříbku určující průřez světlovodem [33]

V obou variantách jsou vyvazující zuby umístěny na přilehlou rovinnou plochu, jejíž výška je stanovena úhlem  $\alpha$ . Tato hodnota se v praxi stanovuje přibližně na třetinu průměru světlovodu. Výška zubů je tedy zásadní parametr pro celkovou fotometrii a rozsvícený vzhled světlovodu.

Pokročilejší struktura světlovodu, může mít i prostorový tvar, kopírující tvar skla světla. V takovémto případě bude křivka určující tvar světlovodu tažena po 3D linii, reprezentující vodící křivku budoucího světlovodu. Při tomto sestavení platí, že podkladová plocha pro budoucí soustavu vyvazujících zubů musí být konstruována tak, aby byla kolmá na požadovanou orientaci vyzařovaného světla. Natočení zubů je také ovlivněno geometrickým tvarem světlovodu, a proto je nutné pro každý zub určit tečný úhel  $\beta$  mezi požadovaným

směrem vyvazovaného světla a tečnou v daném bodě. Následně o poloviční hodnotu úhlu  $\beta$  potočit vyvazující zub. Při takovémto modelu záleží na umístění zdroje světla, jinak by z důvodu dopadu paprsku na přivrácenou plochu zubu, docházelo k Fresnelovu odrazu světla, kde účinnost dosahuje maximálně 10% a zbytek světla se ztrácí.

Pokud si tuto situaci vyobrazíme (viz. obr. 3.8), je názorně vidět, že paprsek dopadající na zub světlovodu (modrá barva), se vlivem totálního odrazu lomí zpět do materiálu světlovodu. Tento paprsek se dále lomí (zelená barva) na válcové čočce do předem definovaného směru záření.



Obrázek 3.8: *Průchod paprsku prostorovým tvarem světlovodu [33]*

## 4 Světlovody používané v automobilovém průmyslu

Jedním z mnoha používaných designových prvků pro vedení světla v automobilovém průmyslu, se čím dál častěji používají optické světlovody, které osvětlují interiér nebo exteriér vozidla. Takto přivedené světlo ze zdroje je následně rozloženo po požadované dráze do prostoru, aby zvýraznilo důležité stylistické prvky, jako jsou obrysy kolem komor jednotlivých světelných funkcí, okrajů nebo samotný obrys celé svítilny. Tento optický prvek je velmi důležitý z designového hlediska a obohacuje tak vzhled svítlen. Takto vylepšená svítlna ztrákní vzhled celého vozu. Zdrojem světla může být i obyčejná žárovka, avšak přilehlý světlovod by musel mít větší rozměry, aby se mohlo světlo do úzkého světlovodu navázat. Také by musel být z teplotně odolného materiálu, jako je například křemičité sklo. Z praktického hlediska se však mnohem častěji používá studené světlo tvořené sérií LED a je tedy možné světelné paprsky rozvádět prostřednictvím průhledných plastů. Materiál těchto plastů může být PC (polykarbonát) nebo PMMA (polymethylmethakrylát) [4].

### 4.1 Aplikace světlovodů

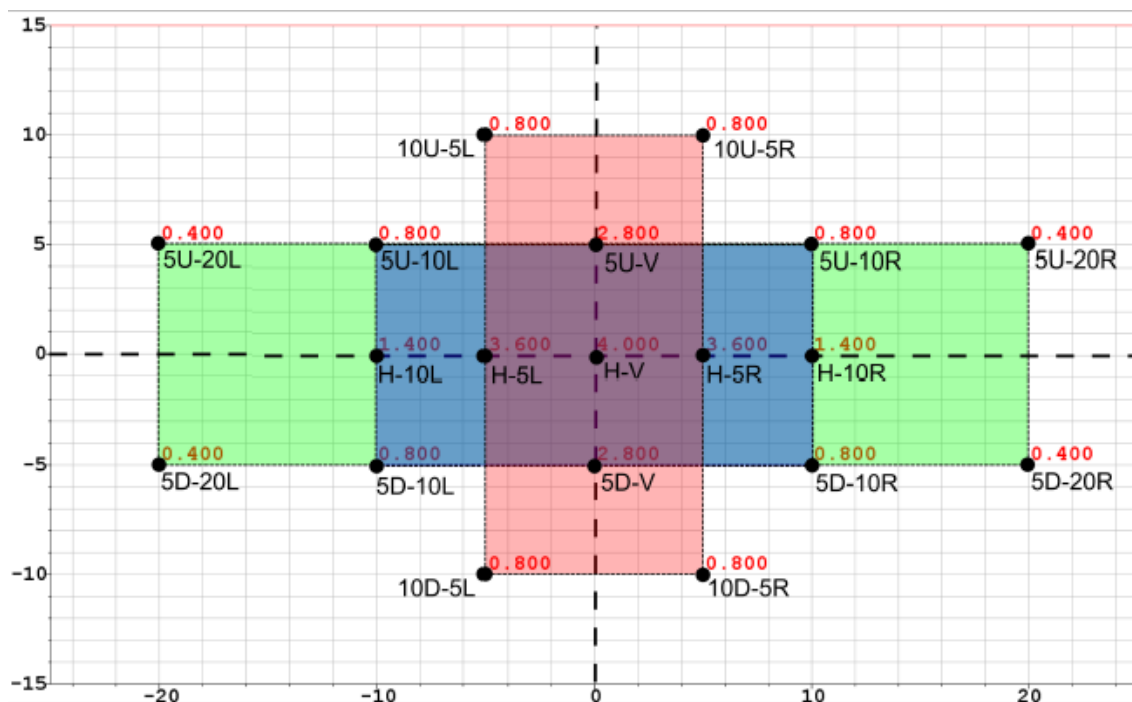
Světelné trubice neboli světlovody se v automobilovém průmyslu nepoužívají z hlediska efektivity svítivosti zdrojového světla, protože se tato efektivita oproti svítivosti LED se pohybuje v rozmezí 15% - 20%. Tato skutečnost bude později rozebrána v samotné kapitole, kde budeme soustřeďovat na praktické testování zadního světla. Výrobce tyto prvky tedy používá výhradně kvůli stylu, a to za cenu nižšího výkonu výsledného osvětlení. V moderní době 21. století zákazníci kladou obrovský důraz na nekonvenční design vzhledu automobilu, k čemuž z nemalé části přispívají právě ony svítilny. Proto se snaží výrobci nevšedními nápady tuto technickou část automobilu zpestřit, aby se tak odlišili od ostatních konkurentů a to i navzdory tomu, že se ubírají opačným směrem z hlediska úspory energie, kde je spíše tendence energii využít co nejefektivněji z důvodu ochrany životního prostředí.

Kvůli nedostatečné účinnosti se použití omezuje víceméně na přední a zadní obrysové funkce. Tyto funkce, u kterých je požadována svítivost okolo 9 lm, nevyžadují u napájecích zdrojů vyšší výkon, a proto tyto zdroje dostačují a nepotřebují tak žádné speciální úpravy. Aby mohly být světlovody použity pro funkci denního svícení, musí být dodrženy mnohonásobně vyšší požadavky na světelný výstup. V takovém případě je nutno použít sérii výkonových LED diod s celkovým světelným tokem podle normy více jak 500 lm. Právě kvůli těmto limitním omezením, které plynou z homogenity světla a dalších problémů, které vycházejí z fyzikálních principů světlovodu, se většinou setkáváme pouze s aplikací světlovodů u obrysových funkcí.

#### 4.1.1 Světlovod plnící zadní obrysovou funkci (norma ECE R07)

Největší využití světlovodů v automobilovém průmyslu je ve funkci obrysového světla. Nejdříve plnila funkci u zadního světla, ale s přibývajícím výkonem se mnohem častěji nasazuje u předního světla. Podle výše uvedené normy musí tato funkce plnit jisté zákonitosti (viz. obr. 4.1). Pro jednotlivé měřicí body podél světlovodů musejí být splněny jasové hodnoty,

uvedené v jednotkách kandely. Na osách jsou vynášeny stupně. A pro splnění podmínek obrysové funkce se musí dostat do bodu H-V jas 4cd a do bodů  $\pm 5^\circ$ , horizontálně pak jas hodnoty 3,6 cd a vertikálně 2,8 cd. V posledním měřeném bodě  $\pm 10^\circ$  musí být hodnota jasu horizontálně minimálně 1,4 cd a vertikálně pak 0,8 cd.



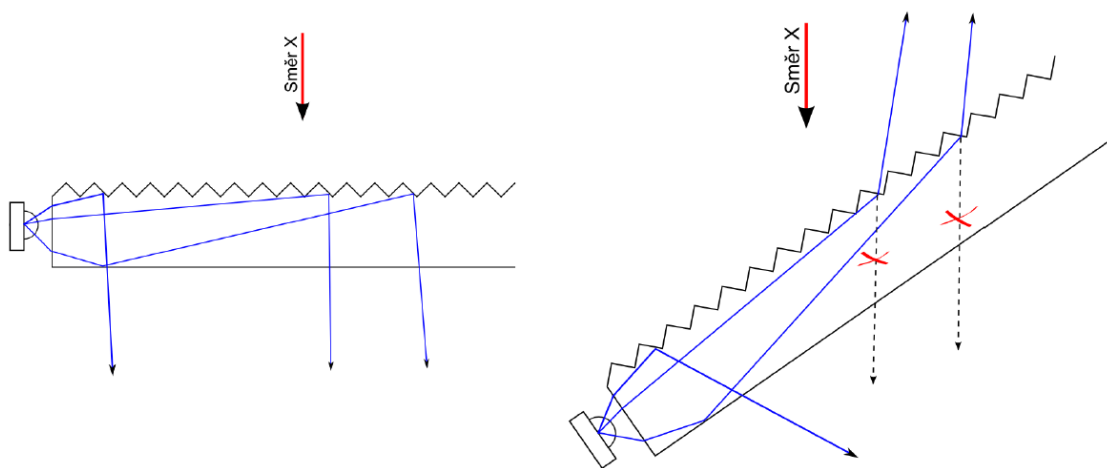
Obrázek 4.1: Úhlové rozložení měřících bodů a hodnot koncové funkce [6]

#### 4.1.2 Světlovod plnící funkci pro denní svícení (norma ECE R87)

S vývojem technologie LED a současným navýšením výkonu LED se výrobci mohli zaměřit na integraci světlovodů do předních světel. Odlišná norma od zadních obrysových světel se liší až 10x vyššími požadavky, a proto je nutné využití výkonových LED nebo zajištění vyššího počtu zdrojů světla. Což ovšem sebou nese i vyšší proudové nároky na elektrický zdroj a zajistit mohutný chladicí systém v podobě hliníkového chladiče situovaného vně světlometu, aby nedocházelo vlivem zahřátí k poklesu světelného toku. Konkrétně pro splnění podmínek normy se musí dostat do bodu H-V jas 400 cd a do bodů  $\pm 5^\circ$ , horizontálně pak jas hodnoty 360 cd, v posledním měřeném bodě  $\pm 10^\circ$  musí být hodnota jasu minimálně 140 cd.

## 4.2 Princip světlovodu

Zdrojová LED dioda, která vytváří světelný svazek, se navazuje do světlovodu přímo, tedy bez jakéhokoliv dalšího optického prvku. Další přesnější variantou je s přispěním kolimátoru, který paprsek do daného směru lépe nasměruje. Pro celkové rozsvícení světlovodné trubice jsou na zadní straně zařazeny světlo vyvazující prvky. Tyto optické prvky tvoří celkový vzhled svítidla, ale i významnou fotometrickou mapu splňující požadavky nařízení normy. Takto rozprostřené prvky jsou zkompletovány v takové vzdálenosti, aby se z nich světlo vyvazovalo co nejvíce v ose X. Takový to princip zajistí splnění hodnot právního předpisu pro obrysová, koncová a brzdová světla pod označením ECE R07. Při rozboru dráhy světelného paprsku (viz. obr. 4.2) vyplývá, že se zde uplatňuje zákon totálního odrazu od válcových stěn světlovodu a proto je pro předpokládanou funkci nutné zajistit vhodné umístění světelného zdroje. Pokud by se takto nestalo a podmínka nebyla splněna, nedojde uvnitř trubice k totálnímu odrazu a světelný paprsek se vyváže špatným směrem (viz. obr. 4.2) [5].

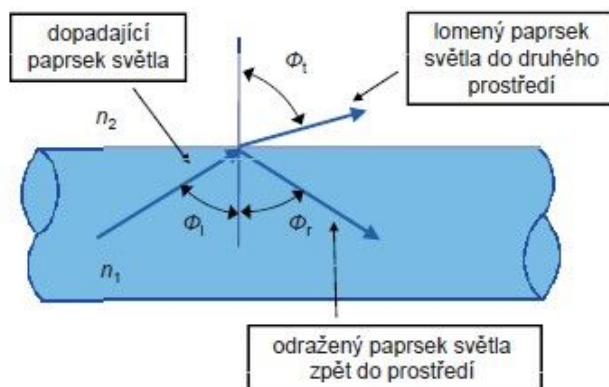


Obrázek 4.2: Srovnání ideálního průchodu paprsku (vlevo) s paprskem, který není kolmý na osu X (vpravo) [5]

K tomuto vyvázání se používá struktura zubů, ve směru šíření paprsku, a tedy v místech kde chceme paprsek nasměrovat mimo světlovod. Dochází k tomu, že paprsek dopadající na vyvazující zub světlovodu, je vlivem totálního odrazu vrácen zpět do materiálu světlovodu, kde se šíří k protější válcové ploše. Na této ploše dojde k lomu a světelný paprsek opouští světlovod. Umístění těchto zubů má podstatný vliv na výsledné vymezení svitu světlovodu. Odlišně navržené jsou i zuby v blízkosti zdroje, na které dopadá paprsek přímo z něj. Naopak se navrhují zuby, na které dopadá paprsek již odražený.

Totální odraz nastává na rozhraní dvou prostředí, kde každé prostředí má jinou hodnotu indexu lomu. Pokud bude paprsek procházet z opticky hustšího prostředí do opticky řidšího, tedy z prostředí o vyšší hodnotě indexu lomu  $n_1$ , do prostředí o nižší hodnotě indexu lomu  $n_2$ , nastává na tomto rozhraní totální odraz a veškerá energie paprsku se s plnou účinností vrátí zpět

do původně hustšího prostředí. Pokud, se tedy bude paprsek šířit pod větším úhlem než je kritický, bude světlovodem procházet světlo (viz. obr. 4.3).



Obrázek 4.3: Odraž a lom průchozího paprsku v prostředí světlovodu [33]

Hodnota kritického úhlu je dána rovnicí:

$$\Phi_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (4.1)$$

Hodnota indexu lomu materiálů světlovodu, využívaných v automobilovém průmyslu, se pohybuje okolo hodnoty 1,5, kde je světlovod obklopen vzduchem o hodnotě indexu lomu 1. V tomto případě každý dopadající paprsek, který dopadne pod větším úhlem než je  $42^\circ$ , se odrazí zpět do původního prostředí a bude pokračovat ve směru šíření, dokud nebude vyvázan.

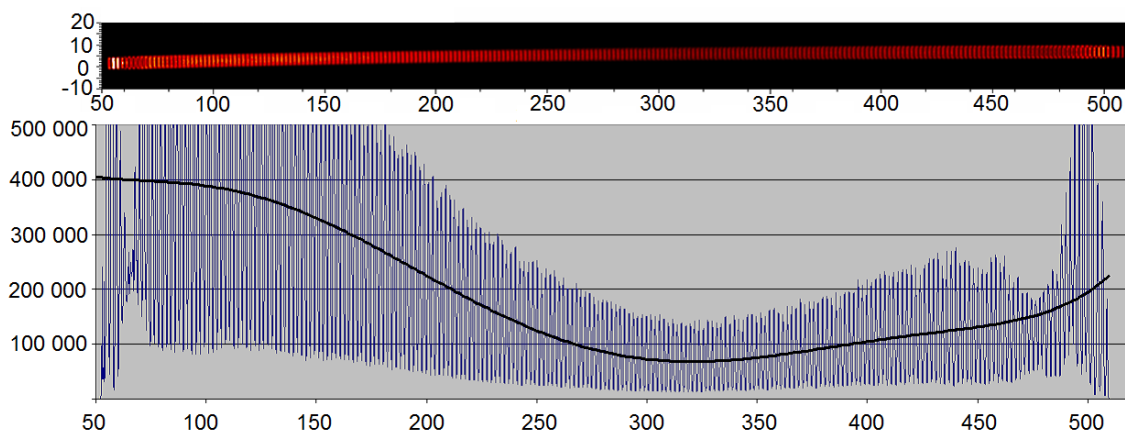
### 4.3 Homogenita světlovodu

Homogenní optické prostředí je takové, které má ve všech svých místech stejné optické vlastnosti jako je průhlednost a index lomu. Tudiž rozložení světla podél světlovodu se bude vzdálenému pozorovateli jevit jako rovnoměrné. Tohoto stavu dosáhneme, pokud doporučený poměr mezi jasem světlovodů v nejsvětlejším ( $L_{max}$ ) a nejtmavším ( $L_{min}$ ) místem bude v maximálním poměru 3 : 1, podle vztahu:

$$u_c = \frac{L_{max}}{L_{min}} \quad (4.2)$$

Toto tvrzení platí pouze v případě, pokud je zaručeno, že se rozdíl jasu mění postupně a ne ve skocích, které by byly již viditelné. Hodnota  $u_c$  není však dána zákonem, a proto při nesplnění homogenity je možné tuto skutečnost diskutovat se zákazníkem.





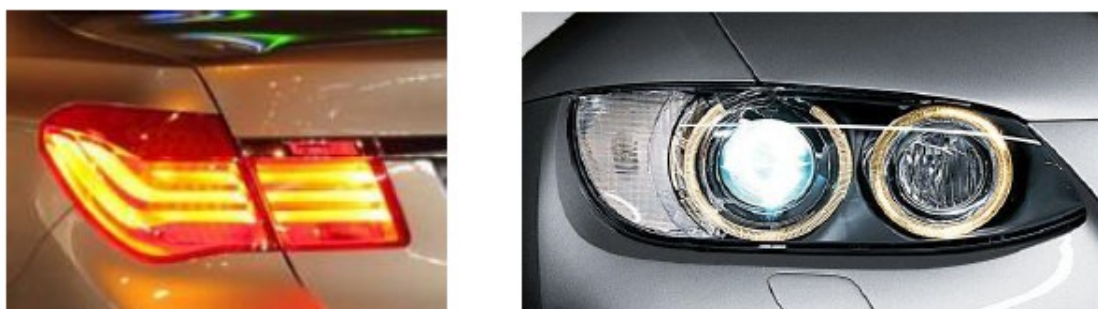
Obrázek 4.4: *Jasová křivka světlovodu, podle které se určuje homogenita světlovodu [33]*

Homogenitu je možné nejdříve simulovat pomocí programu CAE, který dokáže spočítat rozložení světla podél světlovodu na základě metody "ray-tracing". Při této simulaci jsou ze světelného zdroje generovány paprsky světla, podle světelné distribuce použitého světelného zdroje, a tyto paprsky jsou následně zaslány do světlovodu. Na jednotlivých plochách ve světlovodu jsou poté na světelné paprsky aplikovány optické principy, jako je lom paprsku podle Snellova zákona, odrazivost na leštěných nebo drsných plochách a Fresnelové ztráty na jednotlivých plochách. Výstupem je celek paprsků zachycených na výstupní ploše, popřípadě na pomocné ploše, která kopíruje výstupní plochu světlovodu. Tento analyzovaný výstup je softwarově zpracován ve formě jasové fotky, pomocí kterého můžeme určit charakteristiku představující jasovou křivku světlovodu (viz. obr. 4.4). Z takto specifické fotky můžeme vyčíst minimální a maximální stupeň jasu, a zda se světlo mění kontinuálně nebo ve skocích.

## 4.4 Evoluce světlovodů podle výrobců automobilů

### 4.4.1 BMW

Automobilová značka BMW se považuje za průkopníka světlovodů v oblasti vnějšího osvětlení. U těchto vozů se totiž jako první začínají objevovat tyto světelné trubice, které z počátku plnily úlohu jen jako funkce koncového světla. Přesněji, tedy v roce 2007, byl poprvé na trh uveden denní světlomet a v roce 2010 jeho obměna využívající nové světlovody s technologií LED. Později se světlovody začaly vyskytovat i u jiných značek. Typické tvary světlovodů pro značku BMW jsou tenké světelné prstence jako denní svícení. Pro novější modelovou řadu 7, byly pro LED koncová světla, vyvinuty silné planární světelné lišty (viz. obr. 4.5).



Obrázek 4.5: *Trojrozměrná světelná lišta [2] a světlovod pro denní svícení [3]*

#### 4.4.2 AUDI

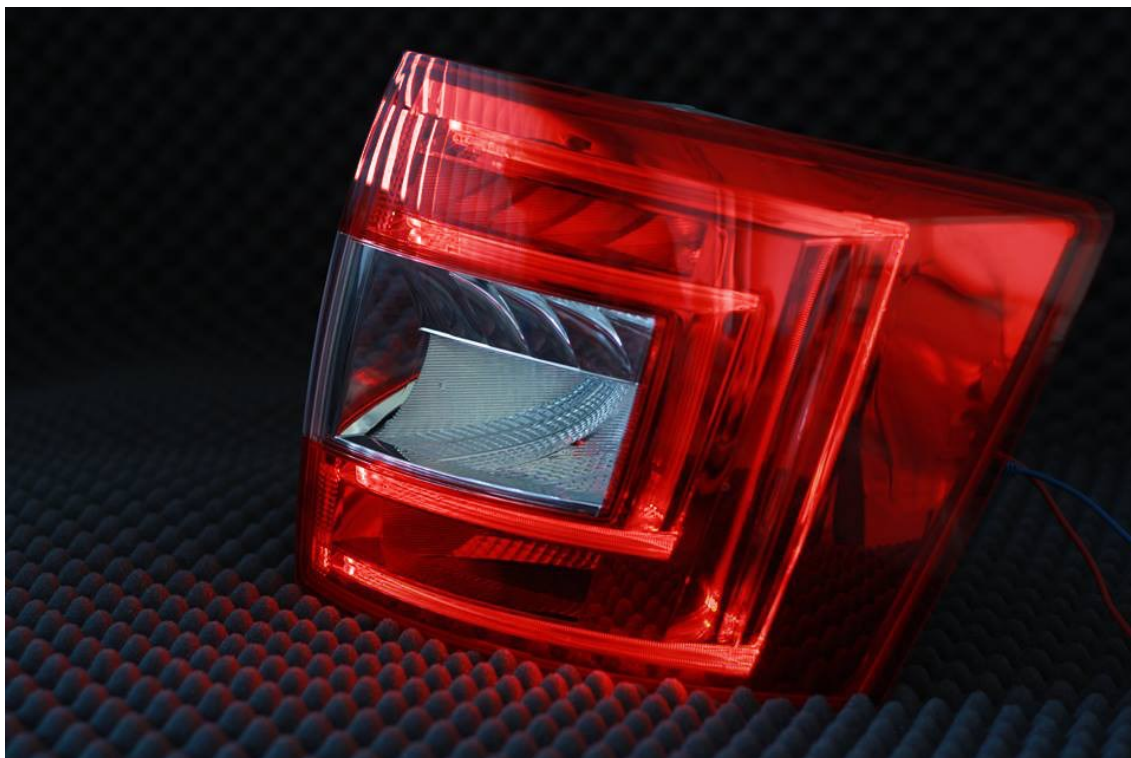
V současné době se u vozů této značky začínají využívat světlovody i pro funkci denního svícení. Tyto prvky se vyskytují např. u typu A3, kde společně se světlometem tvořeným 19 LED pro tlumená a dálková světla, je opatřen i světlovodem, který zajišťuje funkce denního svícení, parkovacích světel a ukazatelů směru [8].



Obrázek 4.6: *Světlovody v předních světlometech Audi A6 [4]*

## 5 Zadní světlo Škoda Octavia III.

Jako testovací prvek bylo zvoleno zadní světlo z vozu Škoda Octavia III. od firmy Varroc lighting systems s.r.o. Zadní světlo bylo poprvé na voze představeno v prosinci roku 2012. Tato koncová světla jsou vysoko umístěná a vytvářejí nezapomenutelný poznávací prvek. Při zapnutí osvětlení svítí celá červená plocha ve tvaru písmene „C”, rámuje bílou centrální část se směrovým světlem a světlem pro zpětný chod (viz. obr. 5.1). Pro brzdová světla je zde použita soustava šesti LED s dlouhou životností.



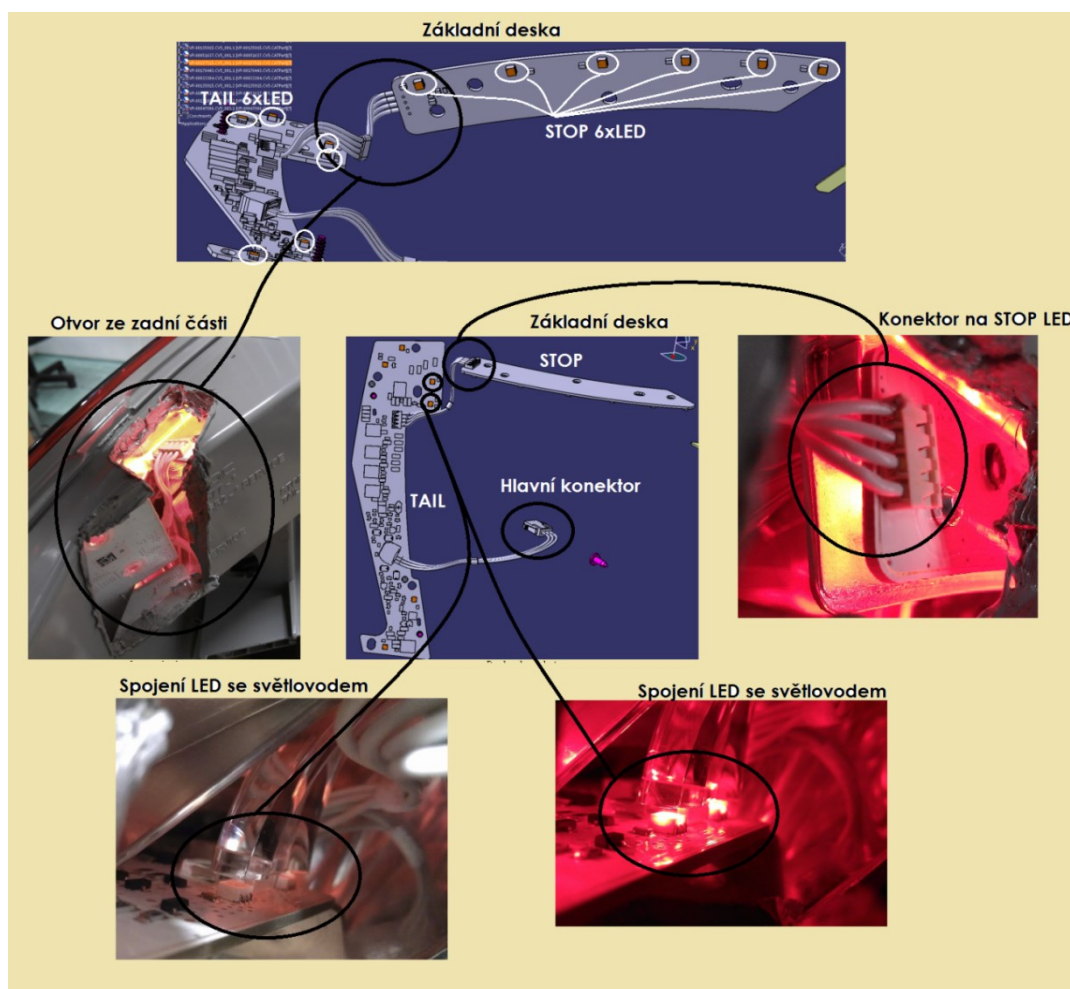
Obrázek 5.1: *Autentická fotografie zadního světla Škoda Octavia III.*

Téměř exponenciálním vývojem LED diod již není nutné osazovat světla výkonovými LED, které by bylo nutné chladiť. Proto byly na brzdové a obrysové světla použity SMD LED diody s vysokou světelnou účinností, konkrétně se jedná o Advanced Power TOPLED typu LA G6SP od firmy OSRAM. Nejpodstatnější parametry jsou uvedeny v tabulce (viz. tab. 5.1) a kompletní informace a parametry můžete nalézt v datasheetu (viz. DVD p.č. 11).

Tabulka 5.1: *Hlavní parametry LED [31]*

Barva	červená
Vlnová délka	623 nm
Materiál	InGaAlP
Světelná efektivita	56 lm/W
Typické napětí	2,1 V
Maximální proud	140 mA
Maximální krátkodobý proud	1000 mA
Operační teplota	-40 °C až +110 °C

Analýza vlastností světlovodů a brzdového světla, z hlediska fotometrických a elektrických veličin vyzařovaného záření modelu zadního světla, byla uskutečněna v laboratořích VŠB-TUO. Model světla bylo nutné rozložit a dostat se co nejbližší k LED, tak aby přílehlá řídicí elektronika nezkreslovala konečný výsledek. Místo řezu bylo vybráno na základě podrobného 3D schématu s rozmístěním veškerých součástí světla (viz. obr. 5.2).



Obrázek 5.2: *Podrobně rozebrané rozmístění částí ve vnitřním prostoru světla*

Řez byl proveden tavícím hrotem při teplotě 250°C, v místě umístění základních desek, na kterých se soustava LED diod nachází, tak aby bylo možné zasáhnout do konektorů a provést potřebné testování bez řídicí elektroniky. Nejvhodnějším řešením bylo vytvořit otvor v zadní části, nikoliv odstraněním předního krycího skla, z důvodu nepřesné kompletace světla při finálním složení. Po vniknutí do prostoru světla bylo zjištěno, že řídicí elektronika nemá vliv na modulaci, a proto se modulátor pro jednodušší manipulaci a napájení umístil k hlavnímu konektoru.

## **5.1 Experimentální měření základních parametrů a charakteristik obrysového a brzdového světla**

Prvotní měření bylo orientováno na analýzu parametrů všech funkcí zadního světla, které využívají LED diody. Konkrétně brzdového světla, kde soustava šesti LED vyzařuje světlo přímo ven a obrysového světla, které je tvořené soustavou světlovodů a plní funkci denního svícení. Zjištěné parametry byly v další kapitole využity pro konstrukci modulátoru. Pro co nejkorektnější výsledky bylo vhodné tato měření provádět ve specifické laboratoři telekomunikační techniky na území VŠB-TUO, která je známá jako temná komora. Tato místnost byla navržena tak, aby dovnitř nevnikalo okolní parazitní světlo. Všechny stěny jsou pokryty akustickou pěnou, aby se eliminovaly odrazy z měřeného zdroje světla.

V rámci měření byla testována volt-ampérová charakteristika (VI), převodová charakteristika (PI), spektrální charakteristika a vyzařovací charakteristika. Jednotlivé měřicí pracoviště byly sestaveny s využitím sofistikovaných měřicích přístrojů (viz. obr. 5.3 a obr. 5.4), při okolní teplotě 25°C a to vždy po uplynutí 30 minut po připojení hlavního napájení.

První měřicí pracoviště (viz. obr. 5.3) bylo sestaveno pomocí stavebních prvků ze sady Thorlabs. Základem byla kolejnice, kde na jedné straně bylo staticky uchycené světlo, a na straně opačné byl dynamicky umístěn senzor. Horizontální posuv sloužil pro nastavení referenční vzdálenosti senzoru od zdroje světla na 300cm. Tato vzdálenost vycházela z testování fotometrických veličin a homogenity světla, kde je vzdálenost totožná. Vertikální posuv sloužil pro nastavení optického středu. Světlo bylo napájeno ze stabilizovaného zdroje s plynulou regulací napětí v rozsahu 0 ÷ 40V, s možností nastavení omezení proudu od 0.1 ÷ 3A. Na takto sestaveném pracovišti bylo možné zaznamenávat následující závislosti:

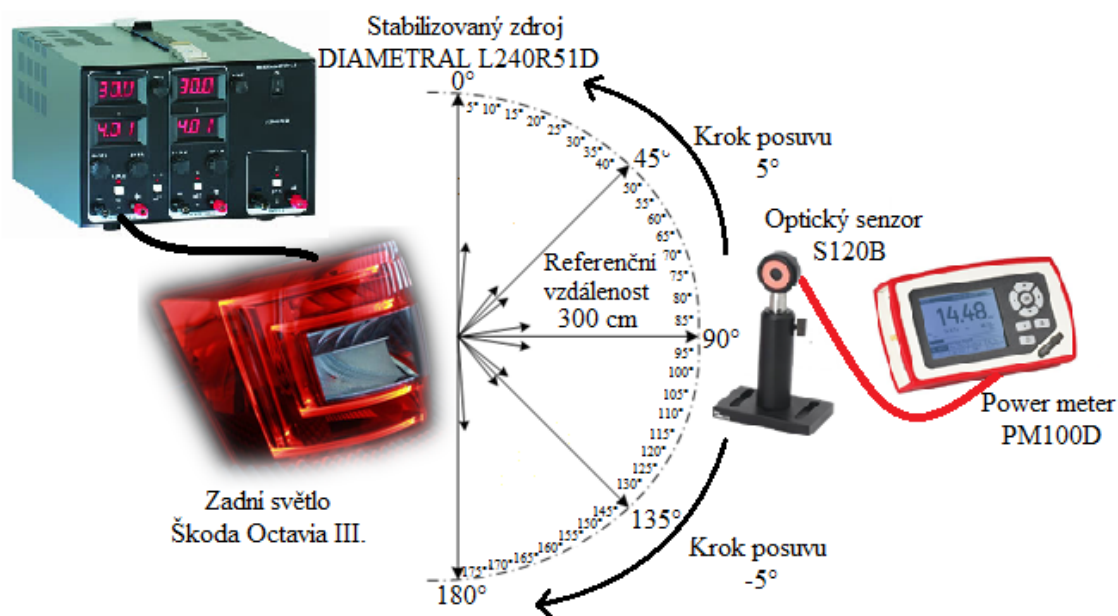
- Změna proudu při změně vstupního napětí, který jsem odečítal z multimetru.
- Změna výkonu při změně vstupního napětí, který jsem odečítal z powermetru.
- Změna relativní intenzity při změně proudu, kterou jsem vyobrazoval pomocí spektrometru v PC.





Obrázek 5.3: Topologie experimentálního měřicího pracoviště pro měření V-A, převodové a spektrální charakteristiky

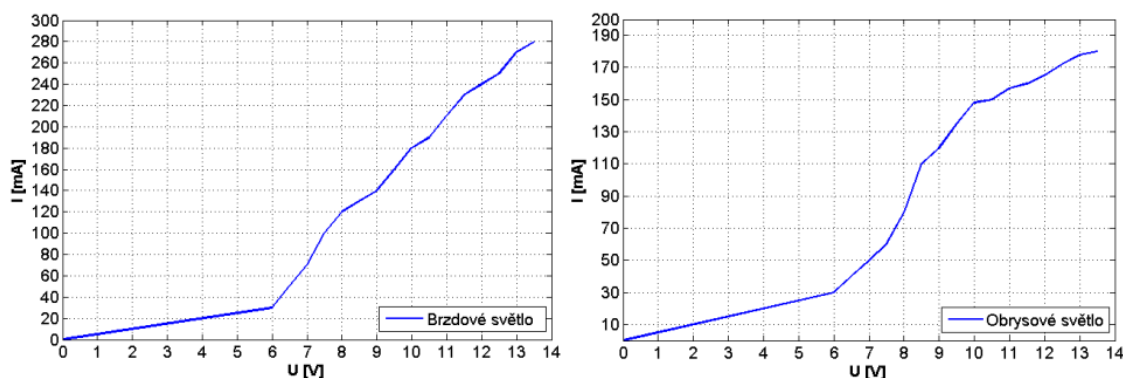
Druhé měřicí pracoviště bylo opět sestaveno pomocí sady Thorlabs, kde jsem zaměnil kolejnici za uhlový posuv, na který byl umístěn senzor pro měření vyzařovací charakteristiky (viz. obr. 5.4).



Obrázek 5.4: Topologie experimentálního měřicího pracoviště pro měření vyzařovací charakteristiky

### 5.1.1 Volt-ampérová charakteristika

Měření bylo zaměřeno na zjištění průběhu vstupního napětí a protékajícího proudu soustavou sériově zapojených LED s předřadným odporem. Prostřednictvím výsledného průběhu bude možné stanovit pracovní bod, který bude využit v následující kapitole při návrhu modulátoru. Vlivem změny napětí na stabilizovaném zdroji DIAMETRAL L240R51D od hodnoty 0 V, s krokem 500 mA až do maximálního povoleného napětí 13,5 V (viz. DVD p.č. 8), bylo možné odečíst hodnotu proudu na multimetru UT720A, který byl zařazen v sérii mezi elektrickým a světelným zdrojem.



Obrázek 5.5: Volt-Ampérová charakteristika brzdového (vlevo) a obrysového (vpravo) světla při teplotě okolí  $T_a = 25^\circ\text{C}$

Celkový průběh V-A charakteristiky je téměř lineární. V grafu (viz. obr. 5.5) je taktéž možné určit otevírací napětí LED diod, které má hodnotu  $U_F = 6\text{ V}$ . Při maximálním vstupním napětí  $U_F = 13,5\text{ V}$ , které je určeno jednotným předpisem pro všechna automobilová světla, dosahoval proud  $I_F = 280\text{ mA}$ . Aby bylo možné takovým napětím napájet LED diody, které jsou dle tabulky (viz. DVD p.č. 14) určeny pro  $U_F = 12,5\text{ V}$ , musel být do obvodu zařazen předřadný odpor, který slouží k nastavení napájecího napětí a proudu odpovídající LED. Tento předřadný odpor se počítá podle vztahu:

$$R = \frac{U_F - (nU_{LED})}{I_{LED}} \quad (5.1)$$

Předřadný odpor bude mít tedy hodnotu  $6,43\ \Omega$  podle následujícího výpočtu:

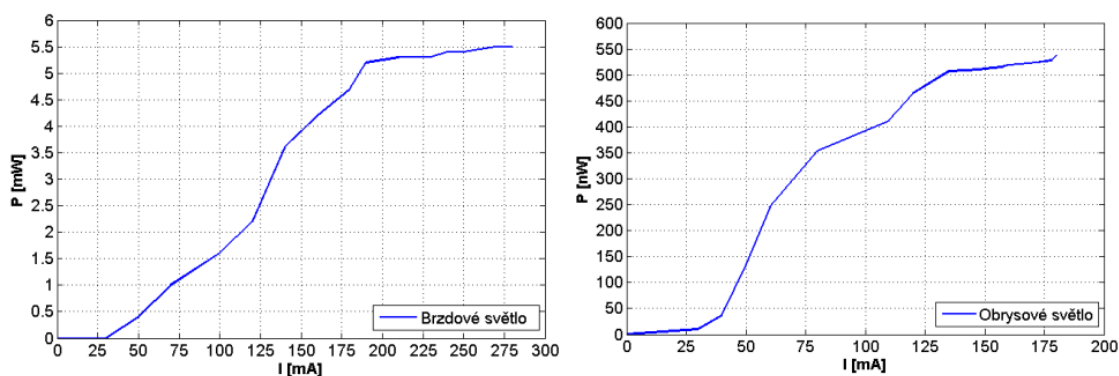
$$R = \frac{13,5 - (6 \cdot 2,1)}{140 \cdot 10^{-3}} = 6,43\ \Omega$$

Úbytek proudu na tomto odporu bude podle následujícího výpočtu dosahovat hodnoty 140 mA. Pokud tento úbytek přičteme k celkovému úbytku na LED, tak se dostaneme na odpovídající hodnotu  $I_F = 280$  mA. Obdobným principem dojdeme i k hodnotám v obvodu pro obrysová světla.

$$I_R = \frac{U_R}{R} = \frac{0,9}{6,43} = 140 \text{ mA}$$

### 5.1.2 Převodová charakteristika

PI charakteristika (viz. obr. 5.6) popisuje závislost optického výkonu  $P$  na protékajícím proudu  $I_F$  LED. Tyto hodnoty byly měřeny pomocí senzoru S120B, který byl napojený na digitální powermetr PM100D. Pro optimální měření výkonu bylo nutné analyzovat hodnotu vyzařovaného spektra, která přímo ovlivňuje vlnovou délku měřených LED u obou funkcí. Tato hodnota se shodovala s tabulkovou  $\lambda = 623$  nm.



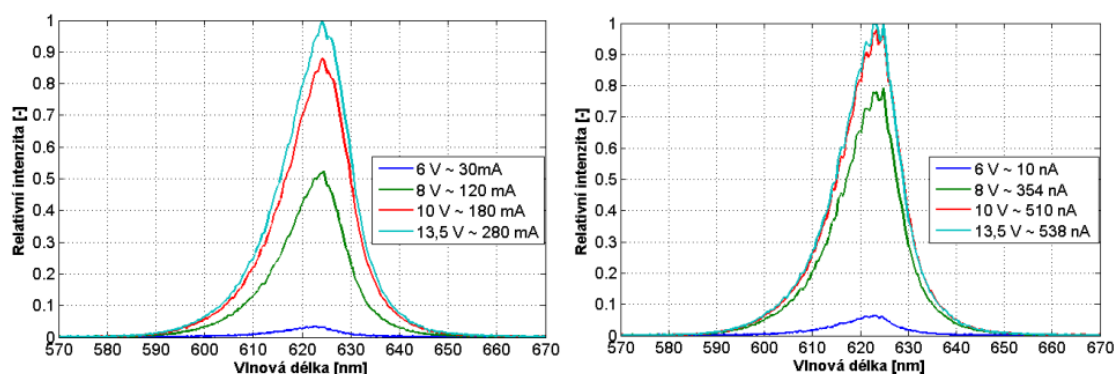
Obrázek 5.6: Převodová charakteristika brzdového (vlevo) a obrysového (vpravo) světla při teplotě okolí  $T_a = 25^\circ\text{C}$

Optický výkon se u obrysového světla lineárně zvyšuje, v závislosti na proudu až do hodnoty  $I_F = 180$  mA, kdy dojde k maximálnímu rozsvícení LED a hodnota výkonu  $P = 538$  nW se už dále nemění. U brzdového světla se lineárně zvyšuje, v závislosti na proudu až do hodnoty  $I_F = 280$  mA, kdy dojde k maximálnímu rozsvícení LED a hodnota výkonu  $P = 5,5$  mW se už dále nemění.

### 5.1.3 Spektrální charakteristika

Dalším měřením fotometrických veličin bylo zjištění spektrální charakteristiky (viz. obr. 5.7) u obou funkcí světla. K měření byl využit spektrální analyzátor Red Tide USB650, který rozloží světlo na jednotlivé vlnové délky a pomocí obslužného softwaru Safibra DAS 2.0 vyhodnotí jednu konkrétní délku. Senzorové vlákno bylo umístěné v přímém směru od světelného zdroje záření v referenční vzdálenosti 300cm.



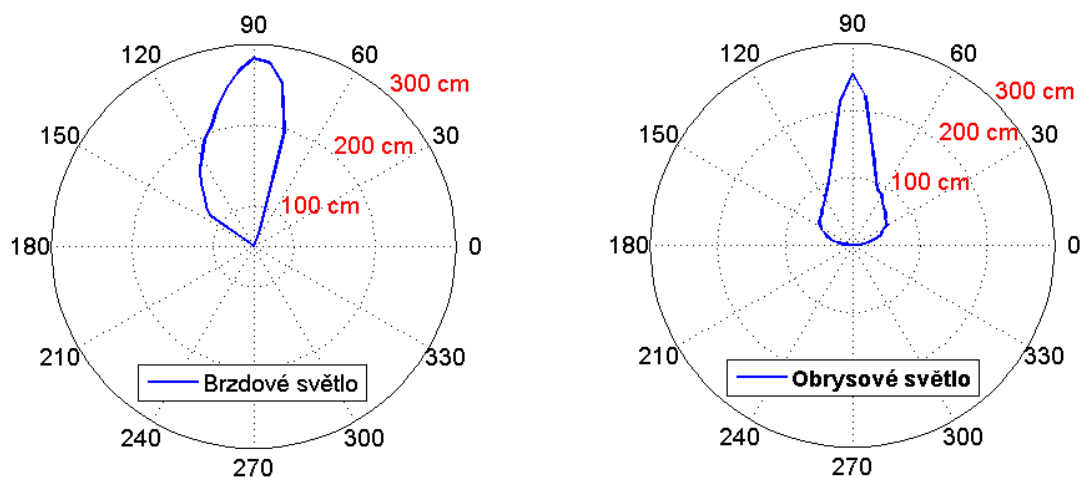


Obrázek 5.7: Spektrální charakteristika brzdového (vlevo) a obrysového (vpravo) světla při teplotě okolí  $T_a=25^\circ\text{C}$

Na výsledné charakteristice lze pozorovat závislost vyzařovaného spektra při změně napětí  $U_F$  v rozsahu 8V – 13,5V. Při nižším napětí než 8V nedošlo k výraznému rozsvícení LED, a proto byla relativní intenzita, která se přímo úměrně zvyšuje při změně napětí  $U_F$ , nulová. Dle grafu (viz. obr. 5.7) lze vidět, že špička křivky odpovídá vlnové délce  $\lambda = 623$  nm.

#### 5.1.4 Vyzařovací charakteristika

Směrová vyzařovací charakteristika obrysového a brzdového svícení u světla Škoda Octavia III. byla realizována z 36 měřených bodů s využitím experimentálního pracoviště (viz. obr. 5.8). Cílem bylo zaznamenávat hodnoty optického výkonu a současně měnit vzdálenost a úhel natočení senzoru S120B od zdroje optického záření. V první fázi byl stanoven maximálně možný optický výkon v referenční vzdálenosti 300cm, který se v průběhu celého měření udržoval na totožné hodnotě. Následně docházelo k natočení senzoru, který byl umístěn na posuvně kruhovém rameni. Na takto dynamicky umístěném senzoru docházelo k posuvu vzdálenosti v rozmezí 0 cm – 300 cm a úhlu natočení senzoru v rozmezí  $0^\circ$  -  $180^\circ$  s krokem  $5^\circ$ .



Obrázek 5.8: Vyzařovací charakteristika brzdového (vlevo) a obrysového (vpravo) světla při teplotě okolí  $T_a=25^\circ\text{C}$

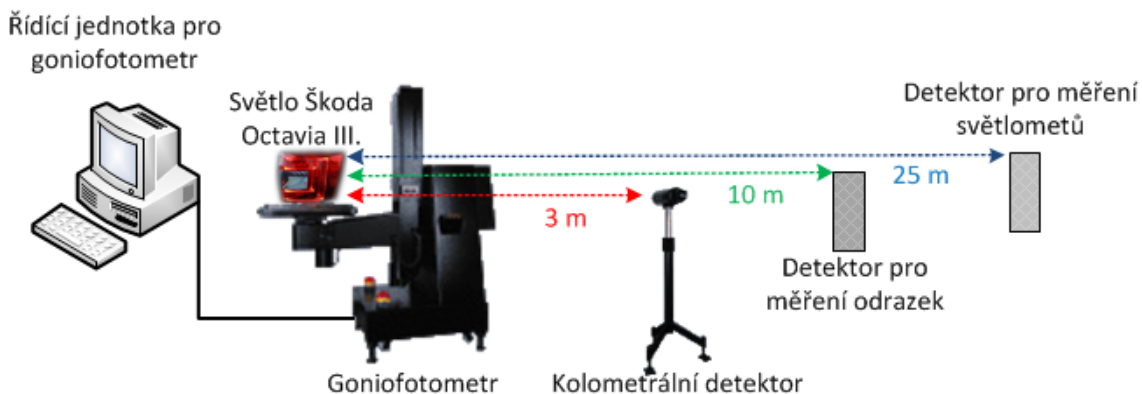
Výsledná směrová vyzařovací charakteristika u obou funkcí je spíše symetrického charakteru. Při změně natočení, přibližně o  $30^\circ$ , je z grafu poznat výrazná změna vyzařovací charakteristiky. Tento strmý pokles vzdálenosti je dán hlavním světelným lalokem, který je pro zadní světelné funkce typický. Lalok vyzařuje světlo v přímém směru od zdroje optického záření pod úhlem  $90^\circ$ .

## 5.2 Experimentální měření fotometrických veličin a homogenity vyzařovaného optického záření obrysového a brzdového světla

Zjištění fotometrických veličin a homogenity, vyzařovaného optického záření obou funkcí zadního světla Škoda Octavia III., bylo realizováno firmou Varroc Light Systém s.r.o. Takto uceleným způsobem jsou testována a kontrolována odborným dohledem všechna světla, která musí plnit předpisy a požadavky zákazníka. Z tohoto důvodu budou testovány funkce u zadního světla se základními funkcemi a v druhém měření s přiřazeným modulátorem. Tento rozdíl bude v závěru práce podrobněji zpracován. Aby byla orientace světla stejná při měření s pozicí světla v automobilu, musí být měřený model fixovaný v sofistikovaném přípravku, jen tak se dosáhne přesného natočení a stabilizace světla.

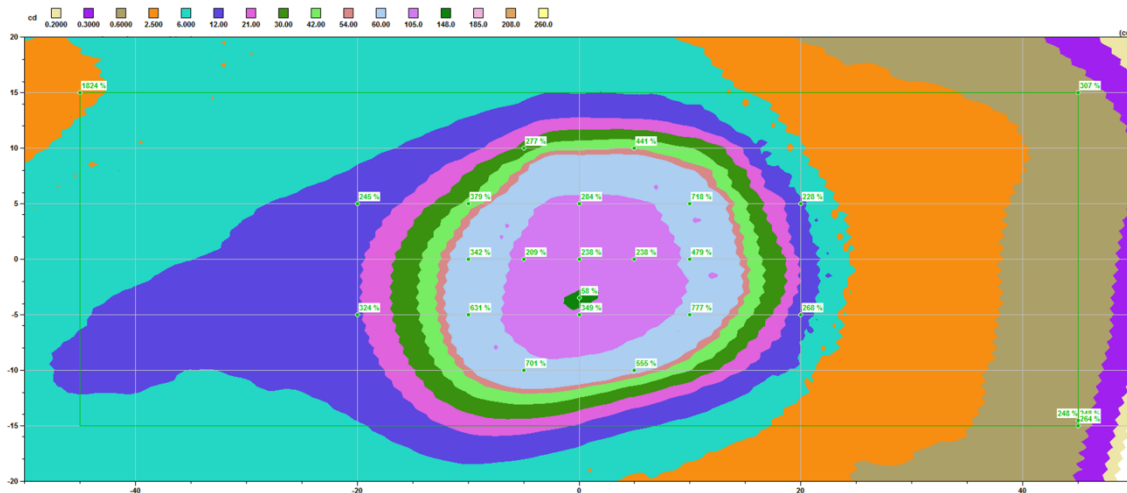
### 5.2.1 Analýza fotometrických veličin vyzařovaného optického záření obrysového a brzdového světla

Fotometrické měření obou funkcí využívající LED u zadního světla Škoda Octavia III., bylo realizováno ve specifické temné místnosti v prostorách Varroc s využitím goniometru (viz. DVD p.č. 27). Ten je definovaný v ECE 37 (Economic Commission for Europe) jako zdroj s nominálními geometrickými a fotometrickými vlastnostmi.



Obrázek 5.9: Testovací pracoviště pro měření fotometrických veličin automobilového osvětlení

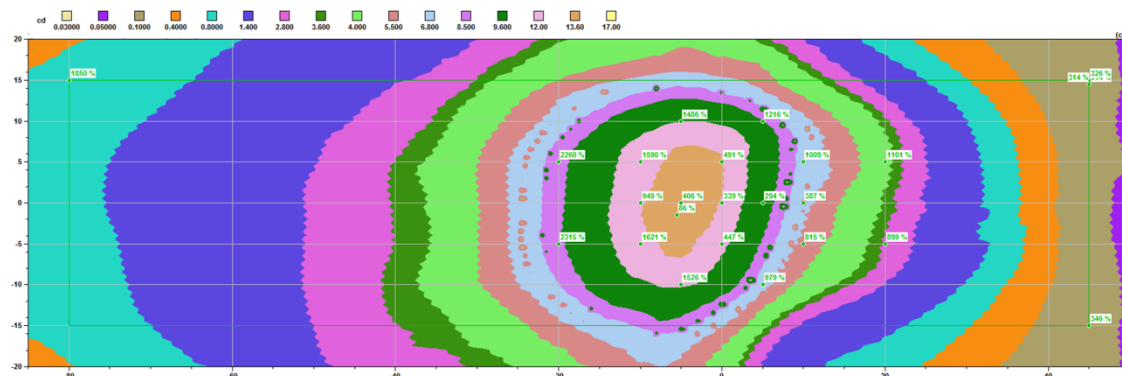
Musí být dodržena teplota okolí  $T_a = 25^\circ\text{C}$ . V takto připravené místnosti dojde k zafixování světla (viz. DVD p.č. 22, 23, 28) a stanovení optického středu, do kterého je umístěn kolorimetrický detektor. Poté je testovaná funkce rozsvícena při plném výkonu po dobu 30 minut. Po uplynulé předpisové době, začíná posuvné rameno goniometru natáčet světlo pod uhlím  $-20^\circ - +20^\circ$  v horizontálním směru, a  $-5^\circ - +5^\circ$  ve vertikálním směru. Každý krok setrval ve své poloze po dobu jedné minuty, dle předpisu ECE R7 (viz. obr. 4.1) se testovalo 19. bodů.



Obrázek 5.10: Rozložení kontrolních bodů při měření fotometrických veličin v isocandelové mapě brzdového světla Škoda Octavia III.

Na základě isocandelové mapy (viz. obr. 5.10 a 5.11) a protokolu intenzit v jednotlivých měřicích bodech (viz. příloha B.1 a B.2), splňuje brzdové a obrysové světlo stanovený předpis. Všechny body u obou funkcí splňují požadavek o několik řádu více než požaduje předpis.

Poměrově nejnižší intenzita u brzdové funkce se nachází v bodě H – 5L = 113 cd. Tato hodnota je v normovaném rozsahu 54 cd – 260 cd, tudíž splňuje podmínky na 209%. Poměrově nejvyšší intenzita se nachází v bodě 5D – 10R = 93,2 cd. Tato hodnota je v normovaném rozsahu 12 cd – 260 cd, tudíž splňuje podmínky na 777%.



Obrázek 5.11: Rozložení kontrolních bodů při měření fotometrických veličin v isocandelové mapě obrysového světla Škoda Octavia III.

Poměrově nejnižší intenzita u obrysové funkce se nachází v bodě  $H - 5R = 10,6$  cd. Tato hodnota je v normovaném rozsahu 3,6 cd – 17 cd, tudíž splňuje podmínky na 294%. Poměrově nejvyšší intenzita se nachází v bodě  $5D - 20L = 9,26$  cd. Tato hodnota je v normovaném rozsahu 0,4 cd – 17 cd, tudíž splňuje podmínky na 2315%.

### 5.2.2 Analýza homogenity vyzařovaného optického záření obrysového a brzdového světla

Následná analýza homogenity byla provedena pomocí digitálního fotoaparátu v tmavé místnosti v referenční vzdálenosti 200 cm (viz. obr. 5.12). U každého takového přístroje, který dokáže vyfotit kvalitní snímek, můžeme pak pomocí relevantních softwarových programů, konkrétně BEAMANALYZERU, měřit hodnotu jasu, což je v podstatě podíl svítivosti zdroje v daném směru a zdánlivé plochy zdroje, v závislosti na referenční vzdálenosti. Fotoaparát, který obsahuje monochromatický čip, před kterým je maska složená z RGB filtru, zaznamenává jas a následně vzniká jasová fotka. Takto pořízená fotografie se dále převádí na jasové hodnoty. Před zaznamenáním fotky se musí provést správná kalibrace čipu (čip - matice), ze kterého se budou odečítat hodnoty a to tak, aby nebyl žádný pixel přesaturovaný. Poté se odečítají přesně takové hodnoty, jaké senzor zaznamená. Kalibrace je seřízena tak, že výsledné hodnoty odpovídají kandelu na čtverečný metr ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ).



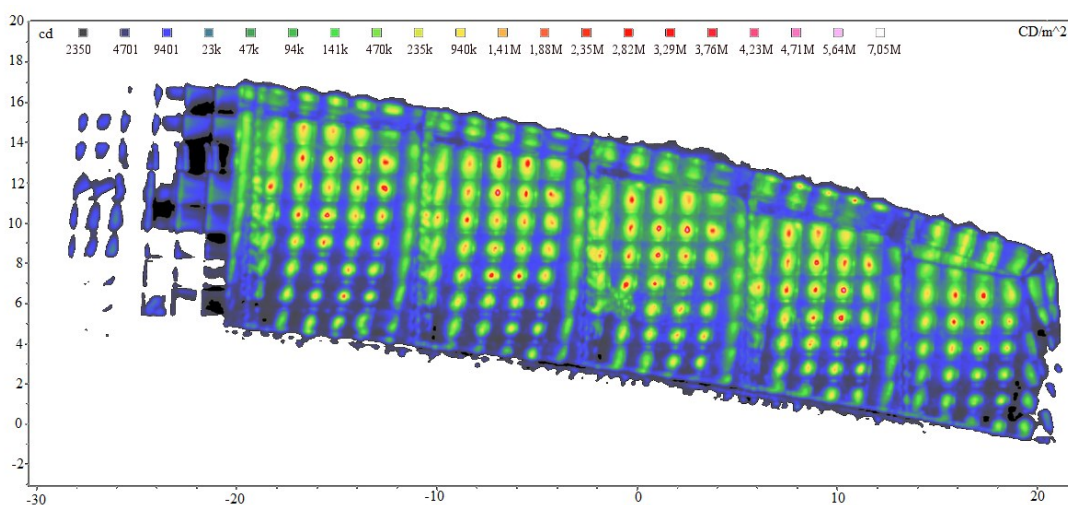
Obrázek 5.12: Experimentální pracoviště pro měření homogenity vyzařovaného optického záření zadního obrysového a brzdového světla Octavia III.

Celá situace se komplikuje tím, že se fotometrické veličiny vztahují k citlivosti lidského oka, tudíž to co fotoaparát zaznamenává, jsou vždy RGB hodnoty čipu a takovéto hodnoty je nutné převést na fotometrické veličiny CIE (International Commission on Illumination) hodnoty XYZ (definice barvy). Princip je tedy takový, že hodnoty RGB z fotoaparátu se konvertují na CIE XYZ model. Tímto způsobem se zjišťuje barva a podle hodnoty Y i přímo jas, takto se dá tedy fotoaparát v jistém slova smyslu považovat jako jasometr.

Dynamika jasu světla je velká, přesněji okolo 10 řádů v rozsahu 20 – 100 000  $\text{cd}/\text{m}^2$ , tedy větší než může fotoaparát pojmout, proto se světlo vyfotí několikrát a to v různých časových expozicích. Na určitých snímcích vznikne zkreslení obrazu z důvodu přesycení čipu a hodnoty, které čip saturují, se následně nebudou používat a jsou vyřazeny. Takovéto zkreslení můžeme označit jako směs žlutých pixelů, které není možné analyzovat. Pro následující výslednou jasovou mapu se použijí tedy jen ty, které jsou v dynamickém rozsahu čipu, čím více vzorků dokážeme odebrat, tím přesnější bude konečný výsledek. Takto nepoškozené snímky kombinujeme do jednoho, který se nazývá jasová mapa. Jestliže bude změřena přesná míra odstupu mezi zdrojem a detektorem, získáme data, která budou rozměrově správná. To

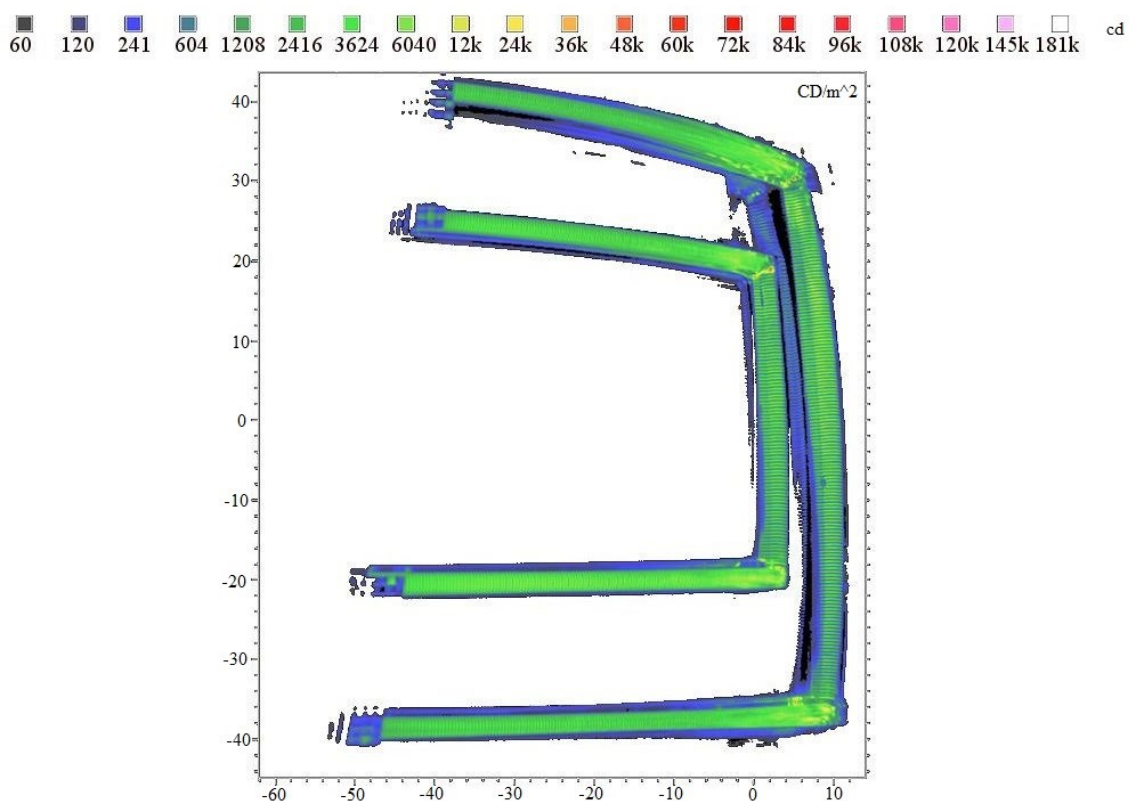
znamená, že jsme schopni zjistit, jaká energie půjde z jednotky plochy, což je vlastně to co jas představuje.

Samotný jas nehraje v praxi velkou roli. Ve větší míře se požaduje rozložení jasu, které má vliv na homogenitu světla, samotná hodnota jasu se neřeší. Zákazník vyžaduje, aby výsledná funkce byla v poměru 1:3. To znamená, že v praxi musí být poměr mezi nejslabším a nejsilnějším bodem na dané funkci, rozumíme na dané ploše výrobku menší než 1:3. Tento předpoklad plyne z citlivosti lidského oka, které ve většině případů nedokáže rozeznat 30% jasový rozdíl. Existují výjimky, protože citlivost oka na jasové hodnoty, vnímá každý člověk odlišně. Ovšem takovéto subjektivní hodnocení nevyplývá ze zákona, ale je individuální podle požadavků zákazníka.



Obrázek 5.13: *Jasová mapa brzdového světla Škoda Octavia III.*

Podle jasové mapy brzdové funkce (viz. obr. 5.13) a přiložené dokumentace, dosahuje bod MAX (-6,95,11,49) nejvyšší jasové hodnoty, a to 7,05 Mcd. Výsledný poměr mezi nejslabším a nejsilnějším bodem brzdové funkce je v oblasti tolerance zakázky a splňuje tedy podmínky homogenity.



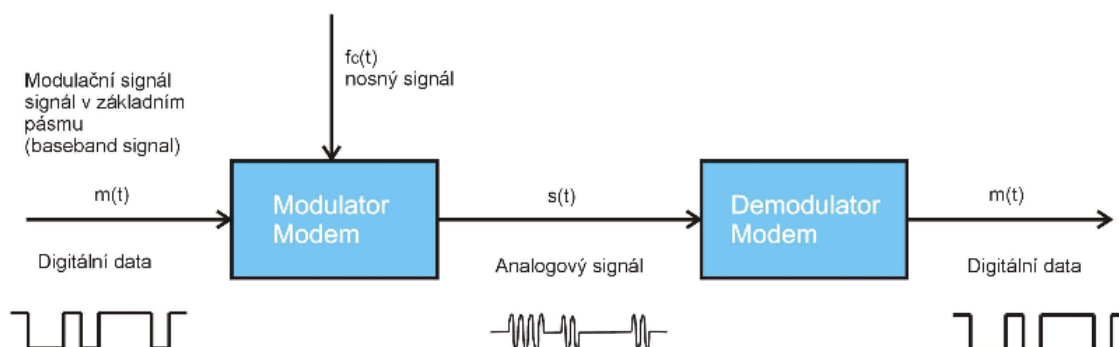
Obrázek 5.14: Jasová mapa obrysového světla Škoda Octavia III.

Podle jasové mapy obrysové funkce (viz. obr. 5.14) a přiložené dokumentace, dosahuje bod MAX (-2,26;18,86) nejvyšší jasové hodnoty, a to 181 kcd. Výsledný poměr mezi nejslabším a nejsilnějším bodem obrysové funkce je taktéž v oblasti tolerance zakázky a splňuje tedy podmínky homogenity.



## 6 Digitální modulace

Z důvodu optimalizace diskretní signály modulují vysokofrekvenční složkou pomocí digitálních modulací s nosnými vlnami. Počet stavů modulace ovlivňuje modulační rychlost, čím více stavů se bude v jeden okamžik přenášet, tím bude modulační rychlost pro stejný objem dat menší. Počet stavů je dán vztahem  $M = 2^n$ , modulace je přizpůsobena přenosovému kanálu.  $M$  je počet stavů,  $n$  je počet bitů nutných k vyjádření daného počtu stavů. Pokud bude přenosový kanál zarušený, tak pro komunikaci s malou chybovostí je výhodnější přenášet menší počet stavů, naopak přenos na kvalitním přenosovém kanále s velkým odstupem signálu od šumu, může probíhat mnohostavová modulace [25].



Obrázek 6.1: Princip digitální modulace

### 6.1 Typy modulací

Signál se tedy může měnit ve frekvenci, amplitudě a fázi. Zmíněnými způsoby se ovlivňují nosné vlny v rámci diskretních stavů a takovýto princip se nazývá klíčování. Podle druhu klíčování se modulace rozděluje na několik možných typů. U jednotlivých typů je nejdůležitějším parametrem efektivita využívaného pásma, tedy co nejlepší přenos objemu dat v omezeném frekvenčním pásmu a využití výkonu. Důležitým kritériem je přenést co nejvíce dat za využití minimálního výkonu.

#### 6.1.1 Amplitudové klíčování

Modulace ASK (Amplitude Shift Keying) je nejjednodušším způsobem digitálních modulací. Používá se v optických spojích, kde modulátor mění intenzitu paprsku polovodičového laseru. Amplituda signálu je kvantována do  $M$  – úrovní a poté přenášena jako amplitudová modulace. Modulace vzniká ovlivňováním nosného signálu signálem modulačním s binárními stavy. Princip je takový, že po dobu trvání logické jedničky je vysíláný nosný kmitočet a po dobu logické nuly se signál nevysílá vůbec.

Informace se v této modulaci přenášejí amplitudou nosného signálu, proto jsou v přenosovém kanále méně odolné proti rušení. Tato modulace se proto častěji používá

s kombinací fázové modulace. A pro vysílání dat v optickém kanále pomocí LED, emitováním nízké a vysoké úrovně světla [26].

Binární jednotka je představována existencí nosné složky s konstantní amplitudou.

$$S_{ASK}(t) = A \cos(2\pi f_c t) \quad (6.1)$$

Logická nula je reprezentována absencí nosné složky

$$S_{ASK}(t) = 0 \quad (6.2)$$

Nosný signál představuje

$$S_n = A \cos(2\pi f_c t) \quad (6.3)$$

### 6.1.2 Frekvenční klíčování

FSK (Frequency Shift Keying), tato modulace je založena na řízení nosného kmitočtu binárním signálem. Střední nosná frekvence  $\omega_n$ , je pro logický stav  $(\omega_n + \Lambda)$ , o malý kmitočtový rozdíl navýšena a pro druhý logický stav  $(\omega_n - \Lambda)$ , snížena. Tato modulace přenáší informaci pomocí změny kmitočtu modulovaného signálu. Po dobu trvání logické jedničky se vysílá kmitočet jedné nosné a kmitočet druhé nosné vlny je vysíláný při logické nule.

Změna kmitočtu může probíhat nespojitě nebo spojitě. Při spojitě změně kmitočtu je spektrum modulovaného signálu užší, oproti nespojitě změně frekvenci, kdy je spektrum poměrně širší, protože vzniká ostrý přechod mezi dvěma kmitočty nosné.

Dvě binární hodnoty jsou prezentovány dvěma frekvencemi  $f_0$  a  $f_1$ , blízkými nosné frekvenci  $f_n$ , symetricky pozicované vůči  $f_n$ .

Logická jednička je prezentovaná

$$S_{FSK}(t) = A \cos(2\pi f_0 t) \quad (6.4)$$

Logická nula je prezentovaná

$$S_{FSK}(t) = A \cos(2\pi f_1 t) \quad (6.5)$$



Šířka pásma potřebná pro tuto frekvenci modulace je závislá od vzdálenosti mezi frekvencemi nosných signálů pro reprezentaci 0 a 1. Odolnost proti chybám je lepší než u amplitudové modulace [25].

### 6.1.3 Fázové klíčování

PSK (Phase Shift Keying) je nejčastěji využívanou modulací. Binární signál zavádí pomocí svých logických stavů do nosné vlny fázové posuny. Změny fáze jsou uplatňovány v definovaných momentech vázaných na časový průběh nosného signálu. Např. skok fáze u dvoustavové modulace BPSK je roven  $180^\circ$ . Při změně fáze dochází k parazitní amplitudové modulaci. Volbou kmityčtu nosné vlny, vzhledem ke kmityčtu modulačního signálu, lze ovlivnit způsob přechodu mezi dvěma logickými stavy a tím i šířku přenosového pásma konečného modulačního signálu [25].

Pro prezentaci logických hodnot se používají dvě fázová posunutí, matematicky vyjádřena:

Logická jednička

$$S_{PSK}(t) = A \cos(2\pi f_n t) \quad (6.6)$$

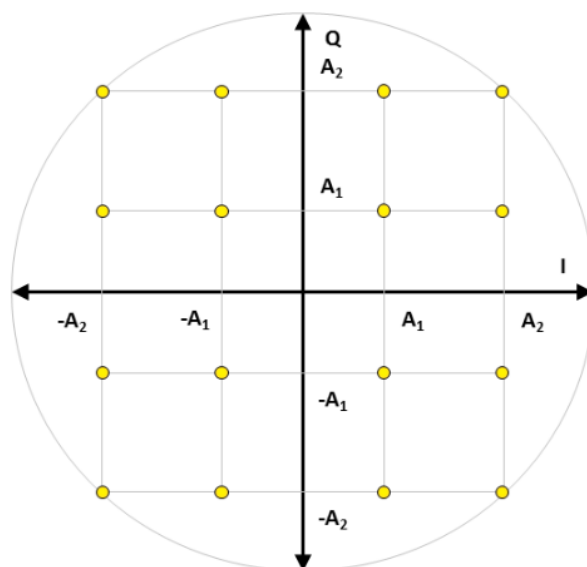
Logická nula

$$S_{PSK}(t) = A \cos(2\pi f_n t + \pi) \Rightarrow S_{FSK}(t) = -A \cos(2\pi f_0 t) \quad (6.7)$$

### 6.1.4 Kvadrurní amplitudová modulace

QAM (Quadrature Amplitude Modulation) kombinuje amplitudové fázové klíčování. Jednotlivé stavy se rozlišují podle amplitudy a fáze nosné vlny. QAM umožňuje přenos dvou signálů ve stejném kmityčtovém pásmu, tudíž jsme pomocí této modulace schopni docílit stejné přenosové rychlosti při poloviční modulační rychlosti. Výhodou QAM modulace je vyšší spektrální účinnost.

Za každým vstupním signálem se moduluje jeden nosný kmityčet. Nosné kmityčty mají stejný průběh (kmityčet a amplitudu), ale jsou v kvadratuře, to znamená, že jsou vzájemně fázově posunuty o  $90^\circ$ . Signálové prvky QAM se interpretují pomocí konstelačního diagramu, který tvoří komplexní rovinu, kde reálná osa odpovídá ose I a osa imaginární ose Q. Při větším rozptýlu poloh signálových prvků, může dojít i k chybnému vyhodnocení signálového stavu [12].



Obrázek 6.2: Ideální konstelační diagram pro 16-QAM modulaci

Kvadraturní amplitudová modulace patří mezi vícestavové modulace a v praxi se používá v rozsahu 4QAM až 2018QAM.

### 6.1.5 Ortogonální multiplex s kmitočtovým dělením

U ortogonálního frekvenčního multiplexu vytvářejí sub nosné vlny ortogonální soustavu, kde jsou rozestupy velmi malé a tím se dosahuje velké spektrální účinnosti systému. Modulační spektra, definovaná při modulaci nefiltrovaným pravoúhlým signálem sinc, se značně překrývají. Každá vlna se nachází na frekvenci, kde spektra ostatních subnosných, procházejí nulou, ale současně nedochází k jejich vzájemným interferencím mezi nosnými vlnami. OFDM se uplatňuje především v pozemní komunikaci, kde je nutné zajistit vyšší přenosové rychlosti (DVB, WLAN).

Matematické vyjádření OFDM signálu v časové oblasti definuje rovnice:

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=0}^{N-1} A_{m,n} e^{j2\pi m \frac{t}{T_s}} \text{Rect}_{T_s}(t - nT_s) \quad (6.8)$$

$$\text{Rect}_{T_s}(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t \leq T_s \\ 0 & \text{ostatní } t \end{cases} \quad (6.9)$$

Kde  $m$  je číslo nosné a  $n$  pořadí symbolu,  $A_{m,n}$  jsou  $n$ -té vyslané symboly na  $m$ -té nosné.  $\text{Rect}_{T_s}$  charakterizuje pravoúhlé okno o délce  $T_s$ , což odpovídá délce trvání OFDM symbolu. Převeďte-li se vztah (viz. rovnice 6.8) do diskrétní podoby s minimálním možným vzorkovacím kmitočtem  $f_{VZ} = N/T_s$ , dostáváme rovnici:

$$s\left(i\frac{Ts}{N}\right) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=0}^{N-1} A_{m,n} e^{j2\pi m \frac{i}{N}} \text{Rect}_{Ts}(t - nTs) \quad (6.10)$$

Kde  $i$  označuje pořadí vzorku. Pokud se vyjádří symbol  $s$ ,  $n=0$  (nultý symbol), potom bude popsán vztahem:

$$s_0\left(i\frac{Ts}{N}\right) = \sum_{m=0}^{N-1} A_{m,0} e^{j2\pi m \frac{i}{N}} \quad (6.11)$$

Vztah (viz. rovnice 6.11) vyjadřuje inverzní diskretní Fourierovu transformaci. Té se využívá při realizaci, jež je umožněna prostřednictvím algoritmu FFT (Fast Fourier Transform) a IFFT (Inverse Fast Fourier Transform). Po aplikaci IFFT bude signál obecně komplexní, aby jej bylo tedy možné vysílat přenosovým kanálem, musí být čistě reálný. Můžeme tedy použít buď Hermitovsky symetrický vstupní vektor hodnot nebo kvadraturní modulátor.

Vzdálenost kmitočtu sub nosných vln vychází  $\Delta f = 1/T_s$ , z toho plyne, že kmitočty ortogonálních sub nosných vln se nacházejí na kmitočtech podle vztahu:

$$f_k = f_0 + \frac{k}{T_s} \quad k = 1, 2, \dots, N - 1 \quad (6.12)$$

kde  $f_0$  je kmitočet, na kterém je modulovaná první sub nosná vlna.

Tyto více tónové modulace jsou obecně odolné vůči mezi symbolovým interferencím ISI, protože je datový tok převeden na  $N$  pomalejších paralelních složek, čímž se prodlužuje doba trvání jednoho symbolu. OFDM má dobrou odolnost proti ISI a ICI, průchodem signálu přenosovým kanálem je však signál v daném prostředí narušen fázovým a amplitudovým zkreslením, interference se zde pak projeví [13].

## 6.2 Základní parametry modulací

Pro porovnání vlastností jednotlivých digitálních modulací, je nutné definovat jejich jednotlivé základní parametry. Mezi hlavní parametry patří šířka pásma modulovaného signálu, modulační a přenosová rychlost a další parametry týkající se samotného hodnocení komunikačního spoje.

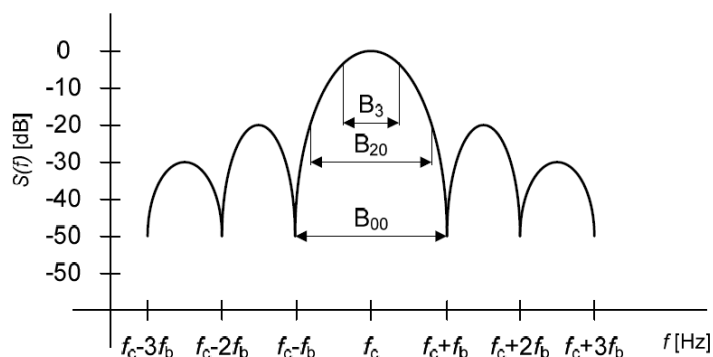
### 6.2.1 Šířka pásma modulovaného signálu

Je podstatným parametrem modulací, při charakterizování pásmových modulovaných signálů, označovaná jako  $B$ . Šířka pásma se stanovuje z výkonové spektrální hustoty pásmových signálů a k jejímu určení se modulovaný signál vyjádří prostřednictvím komplexní obálky v základním pásmu. Konečná výkonová spektrální hustota pásmového signálu  $S(f)$  je definována dle vztahu:

$$S(f) = \frac{1}{4} [S_B(f - f_c) + S_B(f + f_c)] \quad (6.13)$$

Absolutní šířka pásma  $B_a$ , je určena rozsahem frekvencí, v němž má daný signál nenulovou spektrální hustotu. V případě, kdy má spektrum signálu konkrétní nulové body vymezující hlavní výběžek, je šířka pásma nulová.

Tří decibelová šířka pásma označována jako  $B_3$ , je dána rozsahem frekvencí, při nichž klesne výkonová spektrální hustota  $S(f)$  o hodnotu 3dB, tedy o polovinu. Dvaceti decibelová šířka pásma označována jako  $B_{20}$ , je určena poklesem o 20dB. Pokud tyto dvě hodnoty dáme do poměru  $B_{20}/B_3$  dostaneme činitel tvaru, tento parametr výstižně popisuje strmost hlavního laloku křivky  $S(f)$  [1].



Obrázek 6.3: Šířka pásma

### 6.2.2 Modulační a přenosová rychlost

Modulační rychlost udává celkový počet přenesených symbolů za sekundu. Jednotkou modulační rychlosti je jeden baud za sekundu. Přenosová rychlost definuje počet přenesených bitů za sekundu. Jednotka se udává v bitech za sekundu. Vztah mezi přenosovou a modulační rychlostí vyplývá z faktu, že symbol může představovat současně několik bitů, podle druhu modulace. Tento vztah popisuje vzorec:

$$V_{\text{přenosová}} = V_{\text{modulační}} \log_2(n) \quad (6.14)$$

kde  $n$  je počet stavů odpovídajícímu typu modulace.

### 6.3 Hodnocení přenosového spoje

Následující parametry slouží pro hodnocení kvality přenosového spoje, díky nim se může porovnávat míra ovlivnění komunikačního kanálu nežádoucím rušením. Je možné s nimi porovnávat i vliv rušení mezi modulačními formáty a kódováním.

### 6.3.1 SNR

Parametr SNR (Signal to Noise Ratio) odstup signálu od šumu, je vyjádřen poměrem užitečného signálu k nežádoucímu šumu. Jednotkou je bezrozměrná hodnota v decibelech. Se snižujícím se SNR, se snižuje kvalita přenosové cesty a roste chybovost BER. Vlivem těchto skutečností dochází ke zhoršení propustnosti přenosové cesty. Matematicky vyjádřený podle vztahu:

$$SNR = 20 \log \left( \frac{U_{SIG}}{U_{SUM}} \right) \quad [dB] \quad (6.15)$$

$$SNR = 10 \log \left( \frac{P_{SIG}}{P_{SUM}} \right) \quad [dB] \quad (6.16)$$

kde  $U_{SIG}$ ,  $P_{SIG}$  je napětí, výkon signálu na konci přenosové cesty.

$U_{SUM}$ ,  $P_{SUM}$  je napětí, výkon šumu na konci přenosové cesty.

### 6.3.2 BER

Bitová chybovost BER (Bit Error Rate), vyjadřuje degeneraci přenosu, kdy na přijímací straně dochází působením ovlivnění signálu šumem ke špatné reprodukci původních bitů. BER je poměr chybně přenesených bitů k celkovému počtu přenášených bitů za určitý čas (viz. rovnice 6.17). Délka tohoto času by měla být taková, dokud se bitová chybovost se zvyšujícím se časem již nemění. Bitová chybovost se pohybuje v rozmezí  $10^{-4}$  až  $10^{-12}$ , kdy hodnota  $10^{-12}$  je brána jako hraniční a dostatečně nízká, tedy vhodná pro přenos.

$$BER = \frac{\text{počet chybně přenesených bitů}}{\text{celkové množství přenesených bitů}} \quad [-; bit, bit] \quad (6.17)$$

### 6.3.3 MER

MER (Modulation Error Ratio) tento chybový vektor je definován jako vzdálenost od ideální polohy vybraného symbolu k aktuální poloze přijatého symbolu. Výsledek je nejčastěji vyjádřený jako výkonový poměr v dB. Pokud se k vykreslování symbolů modulace v čase používá IQ diagram, tvoří výsledek malý shluk symbolů, ideálně by však tento shluk symbolů měl být co nejmenší, nejlépe jeden bod. MER určuje poměr průměru správně umístěných symbolů k špatně umístěným (viz. rovnice 6.18).

$$MER = 10 \log \left( \frac{\text{průměru správně umístěných symbolů}}{\text{průměru chybně umístěných symbolů}} \right) \quad [dB] \quad (6.18)$$

Tato chyba může být také definována jako: poměr součtu čtverců amplitud ideálních symbolových vektorů, k součtu čtverců amplitud chybových symbolových vektorů (viz. rovnice 6.19).

$$MER = 20 \log \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (I_k^2 + Q_k^2)}{\sum_{k=1}^N (\delta I_k^2 + \delta Q_k^2)}} \quad (6.19)$$

kde  $I_k$  je ideální velikost složky I,  $Q_k$  je ideální velikost složky Q,  $\delta I_k$  je rozdíl mezi velikostí ideální a měřené složky I,  $\delta Q_k$  je rozdíl mezi velikostí ideální a měřené složky Q.

V tabulce (viz. tab. 6.1) jsou hodnoty pro optimální hladinu MER pro vybrané druhy modulačních formátů, schválené mezinárodním standardem DOCSIS[15]

Tabulka 6.1: *Sumarizace MER hodnot [15]*

Modulační formát	Nedostačující MER [dB]	Dostačující MER [dB]
QPSK	7.10	40 - 45
16 – QAM	15 – 18	40 - 45
64 – QAM	22 – 24	40 - 45
256 – QAM	28 – 30	40 - 45

#### 6.3.4 EVM

EVM (Error Vector Magnitude) je metoda pro vyhodnocování parametrů digitálních modulací. Je založená na porovnávání aktuálních hodnot amplitudy a fáze modulovaného signálu s referenčními hodnotami, které jsou průběžně počítané na základě parametrů systému. Rozdíl mezi těmito hodnotami tvoří základní měření EVM. EVM představuje střední kvadratickou hodnotu chybových hodnot jednotlivých stavů.

$$EVM = \sqrt{\frac{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\delta I_k^2 + \delta Q_k^2)}{v_{max}}} \quad (6.20)$$

kde  $\delta I_k$  je rozdíl mezi velikostí ideální a měřené složky I,  $\delta Q_k$  je rozdíl mezi ideální a měřenou složkou Q.

#### 6.3.5 Diagram oka

Diagram oka je jednou z variant, kterou může být hodnocena kvalita přenosu signálů. Tento diagram souvisí s chybovostí BER a odstupem signálu od šumu SNR. Zobrazuje hardwarové nebo systémové nedostatky a pomocí osciloskopu je možné tímto diagramem vykreslit modulované a modulační signály. Pro správný tvar diagramu oka musí být použity

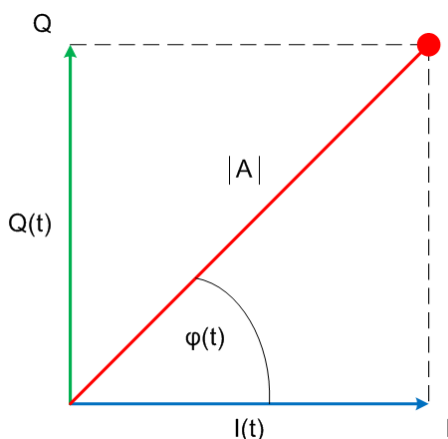
veškeré kombinace bitové sekvence, aby bylo možné správně detekovat chyby v systému. Z oka diagramu lze zjistit:

- Nejvhodnější okamžik pro vzorkování demodulovaného signálu v přijímači.
- Rezervu poměru signálu od šumu (polovina celkové velikosti rozevření oka).
- Senzitivitu systému proti chybám v časování.
- Rozptyl průchodu nulou.

Diagram oka lze také vytvořit pro vícecestovou modulaci. V takovém případě se na horizontální osu přivede signál  $I(t)$  a na vertikální osu signál  $Q(t)$ . Tímto způsobem mohou vzniknout dva typy zobrazení, konstelační a vektorové. Konstelační vznikají tím, že jsou hodnoty zobrazeny pouze v okamžiku vzorkování a vektorové zobrazení vzniká při plynulém zobrazení.

### 6.3.6 IQ diagram

Mnoho metod používaných při modulování signálu v digitálních komunikacích, lze provádět pomocí IQ modulátorů, kde je možné kterýkoliv vysokofrekvenční signál o úhlové frekvenci  $\omega$ , o časově proměnné amplitudě  $A(t)$  a o časově proměnné fázi  $\varphi(t)$ , zobrazit v komplexní rovině jako složený fázor ze dvou ortogonálních složek  $I(t)$  a  $Q(t)$  se shodnými frekvencemi a se vzájemnou fází  $90^\circ$  (viz. obr. 6.4). Každému amplitudově fázovému stavu dané modulace odpovídá konkrétní vzdálenost těchto ortogonálních složek [16].



Obrázek 6.4: Zobrazení kvadrurních složek IQ diagramem

## 7 Návrh a konstrukce vysílací části komunikace mezi vozidly

Tato oblast patří mezi hlavní záměr této závěrečné práce, jedná se o návrh vysílacího systému. Výsledný systém bude kompatibilní se zadním světlem Škoda Octavia III. a umožní modulovat brzdovou funkci, která bude ovlivňována neustálým svitem obrysové funkce. Smyslem této práce je tedy otestovat samotnou komunikaci brzdové funkce, ověřit zdali má obrysové funkce, tvořená soustavou světlovodů, vliv na tuto komunikaci. Realizovaný koncept vysílače může být použit pro V2V komunikaci s kombinací, s PIN detektorem nebo s inovativnějším řešením, s pomocí kamerového systému u vozidla na přijímací straně.

### 7.1 Optické bez vláknové datové sítě

Tato technologie je založená na optické síti a dosahuje vysokých přenosových rychlostí v oblasti bezdrátové komunikace. Jedná se o širokopásmový symetrický přenos a jako zdroj optického záření je použit laser nebo LED. Nevýhodou této technologie je závislost na atmosférických vlivech přenosového prostředí (sníh, mlha, smog, a další).

Průběh přenášeného optického signálu je ve formě okamžitého výkonu  $P_i(t)$  zdroje optického záření ve vysílači. Naopak výsledný přijatý optický signál  $i_{ph}(t)$ , odpovídá okamžitému foto proudu fotodiody v přijímači. Optický bezvláknový kanál lze modelovat jako lineární, pásmový a časově neměnný systém s okamžitou hodnotou vstupního optického výkonu  $P_i(t)$ , výstupním foto proudem  $i_{ph}(t)$  a impulsní odezvou systému  $h(t)$ .

Optické bezvláknové sítě jsou v reálných situacích provozovány v přítomnosti okolního parazitního optického záření v infračervené nebo viditelné oblasti spektra. Toto parazitní záření lze minimalizovat použitím optického filtru, ale přesto se přidává výstřelkový šum, který je obvykle dominantním zdrojem šumu v přijímači. Na obecném modelu optického bezvláknového kanálu je tento šum označen jako  $n(t)$  [30].

### 7.2 Pracovní oblast brzdového světla

Při sešlápnutí brzdového pedálu, dojde k rozsvitu brzdového světla, v tento moment můžou být vyslány informace. Pokud by došlo k modulování v celé lineární oblasti LED, tedy v rozsahu 0% - 100%, tak by nastal z hlediska homologace problém, jelikož by docházelo ke znatelnému poklesu jasu, což předpis ECE R07 neumožňuje. V určitých momentech by dokonce došlo k úplnému pohasnutí. Pokud naopak zvolíme nízký rozkmit, může se výsledný optický signál přiblížit k hodnotám šumu. Zde je tedy nutné najít kompromis.

Při modulaci je nutné počítat s poklesem intenzity optického záření o zvolenou hodnotu 15%. Tento pokles byl zvolen na základě doporučení a neměl by mít negativní vliv na funkci světla, což bude ověřeno v poslední kapitole. Modulátor je tedy navrhnutý tak, že soustava LED svítí na střední hodnotě  $I_{F(stf)} = 280 \text{ mA}$ , což představuje 100% výkonu (viz. obr. 7.1). Komunikace bude probíhat od 85% - 115%. Jednotlivé hodnoty minima a maxima jsou

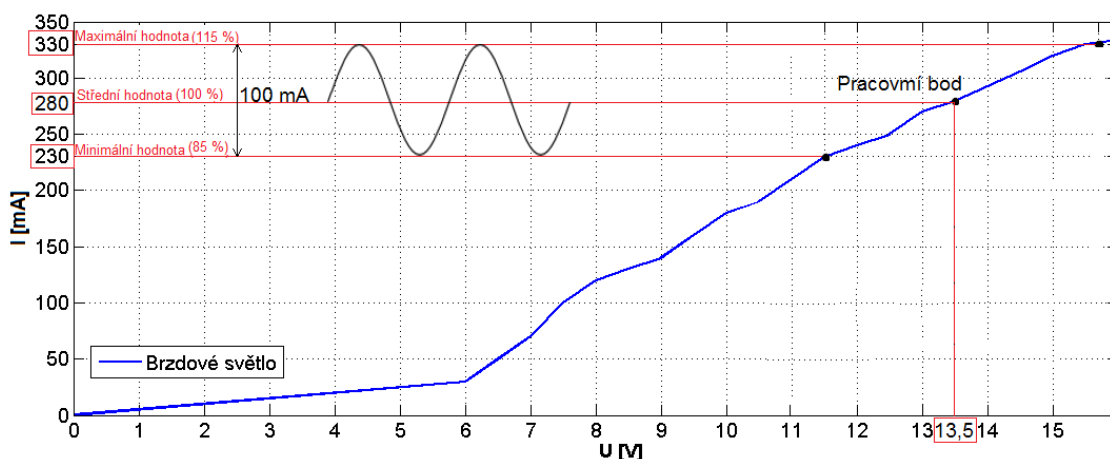


vypočítány na základě vztahu (viz. rovnice 7.21 a 7.22), podle dříve změřených hodnot (viz. obr. 5.5 a 5.6).

$$\bar{X}_{I \max} = \frac{I_{F(stř)} [A] I_{F(max)} [\%]}{I_{F(stř)} [\%]} = \frac{280 \cdot 100}{85} = 329,41 \cong 330 \text{ mA} \quad (7.21)$$

$$\bar{X}_{I \min} = \frac{I_{F(stř)} [A] I_{F(min)} [\%]}{I_{F(stř)} [\%]} = \frac{280 \cdot 70}{85} = 230,59 \cong 230 \text{ mA} \quad (7.22)$$

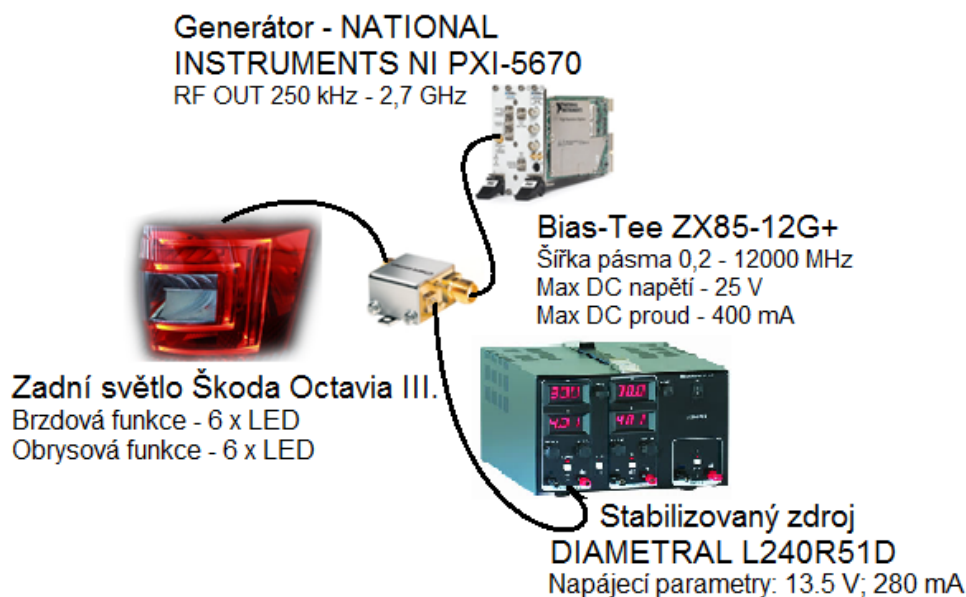
LED, která je prvkem soustavy brzdové funkce světla, je limitována spolu s předřadným odporem do 280mA, tato hodnota bude překročena o 50mA. Jelikož se jedná o velice krátkodobé přetížení bude klasifikováno jako maximální krátkodobý proud, což odpovídá (viz. tabulka. 5.1) hodnotě 1 A. Díky tomuto parametru je možné LED modulovat nad 100% výkonu.



Obrázek 7.1: Pracovní oblast komunikace zadního světla

### 7.3 Návrh modulátoru

Návrh konceptu vysílací části (viz. obr. 7.2), která bude zprostředkovávat optický signál, kterým se budou přenášet informace, je založen na mezinárodní studii v oblasti VLC. Tento koncept bude pomocí funkcí využívající LED vysílat signál, který bude možné na přijímací straně zpracovávat PIN detektorem nebo kamerovým systémem vozidla. Samotný systém je možné modifikovat tak, aby byly modulované obě funkce současně nebo každá zvlášť. Pro komfortnější integraci systému do zadního světla, byly v originální kabeláži zadního světla vyhotoveny konektory (viz. obr. 7.3).

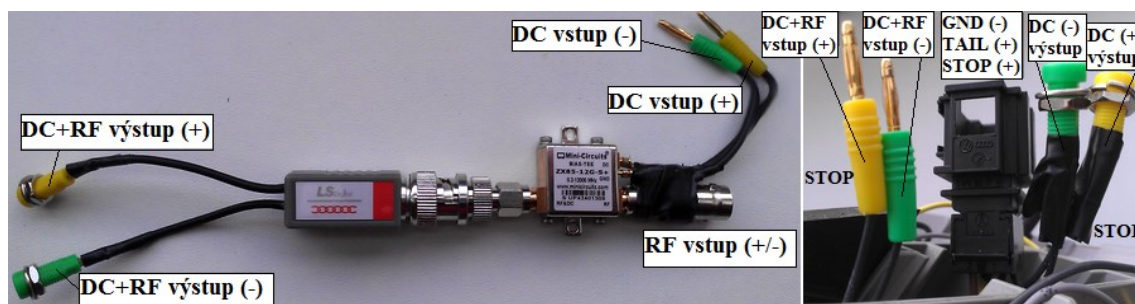


Obrázek 7.2: *Blokové schéma konceptu vysílacího systému pro funkce zadního světla Škoda Octavia III.*

Pro nastavení pracovního bodu slouží stabilizovaný zdroj, který do systému přivádí stejnosměrné napětí  $U_F = 13,5 \text{ V}$ , což odpovídá 100% optickému výkonu obou funkcí. Tento signál je napojen na DC port součtového členu. Dalším prvkem v tomto konceptu je generátor PXI-5670, jenž je zdrojem informací, které následně moduluje, v tomto případě PSK a QAM modulací. Signál z tohoto generátoru vstupuje na RF port součtového členu. Již zmiňovaný součtový člen Bias-Tee ZX85-12G, plní funkci součtu jednosměrného signálu na DC portu s radiofrekvenčním signálem na RF portu, které kombinuje na výstupní port RF+DC. Výsledkem této operace bude kmitající signál z generátoru okolo stejnosměrného signálu ze zdroje. Výhodou takového zapojení je, že můžeme modulovat jen potřebnou část optického výkonu (viz. obr. 7.1), nikoliv celý optický výkon, čímž by opakovaně docházelo k úplnému poklesu intenzity světla.

### 7.3.1 Bias-Tee ZX85-12G

Bias-Tee ZX85-12G+ od americké firmy Mini-Circuits® disponuje velkou šířkou pásma 0,2 MHz – 12000 MHz (viz. DVD p.č. 12), při pracovní teplotě  $-55 \text{ }^{\circ}\text{C} - 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Impedance má typickou hodnotu  $Z_0 = 50 \text{ }\Omega$ . Předností tohoto členu je využití v obvodech s vyššími proudy, jelikož je DC port podle katalogových parametrů stavěný na maximální proud  $I_{\max} = 400 \text{ mA}$ , při vstupním napětí  $U_{\max} = 25 \text{ V}$ . Bias – Tee využívá vstupní a výstupní konektor typu SMA při konstrukčních rozměrech celého zařízení 1,88 cm x 1,9 cm x 1,17 cm [28].



Obrázek 7.3: Součtový člen Bias-Tee ZX85-12G+ (vlevo), osazený konektor (vpravo)

## 7.4 Testování modulátoru

Před finální realizací konceptu pro přenos informací pomocí brzdové a obrysové funkce zadního světla, bylo provedeno frekvenční testování navrhnutého modulátoru. Experimentální měření opět proběhlo v temné místnosti eliminující parazitní světlo, které by mohlo negativně ovlivnit výsledky měření. Měřící pracoviště bylo složeno podle blokového schématu (viz. obr. 7.4), pro analýzu frekvenčního rozsahu součtového členu Bias-Tee a pro zdroj optického signálu soustavu LED.



Obrázek 7.4: Blokové schéma zapojení měřícího pracoviště pro testování frekvenčních charakteristik

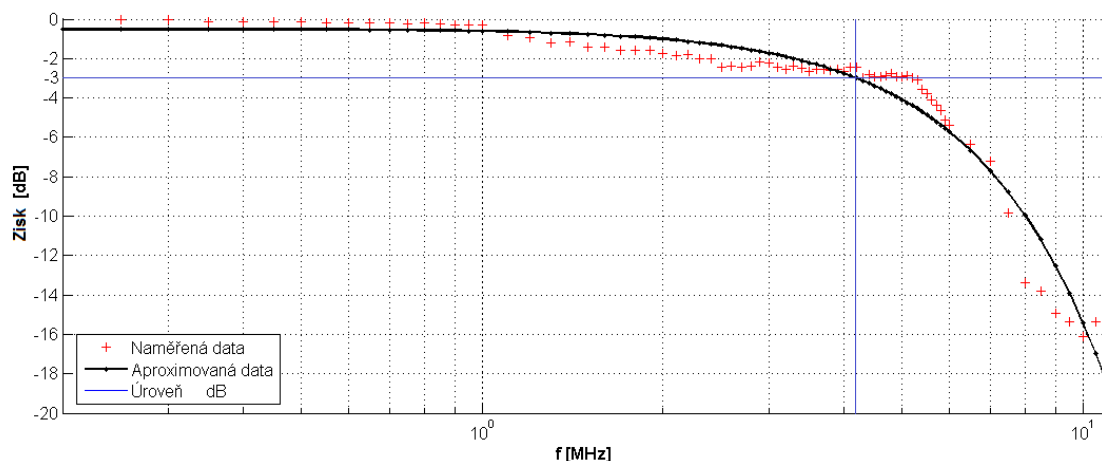
Jako elektrický zdroj signálu bylo využito signálového generátoru RHODE&SCHWARZ SMB 100A, pomocí kterého bylo do obvodu dodán harmonický sinusový signál, u kterého byla v krocích změněna frekvence v rozsahu 0,2 MHz – 11 MHz. Pro analýzu výsledků byl aplikován osciloskop Lecroy 204xi, který za pomoci fotodetektoru THORLABS PDA10A vyhodnocoval přijímaný signál ze zadního světla.

Výstupem tohoto měření je frekvenční charakteristika Bias-tee (viz. obr. 7.6) a soustavy LED (viz. obr. 7.5), která je složena ze závislosti frekvence a napětí špička – špička, která byla následně pro správnou vypovídající hodnotu převedena, podle vztahu (viz. rovnice 7.23) na zisk k vzhledem k referenční hodnotě 200 kHz. Takto dosažené výsledky byly pro vyrovnání hodnot

aproximovány regresní křivkou v programu MATLAB 7.0.1. Pro určení přenosové šířky pásma byla odečtena hodnota zisku, u které nastal pokles vzhledem k referenční hodnotě o 3 dB.

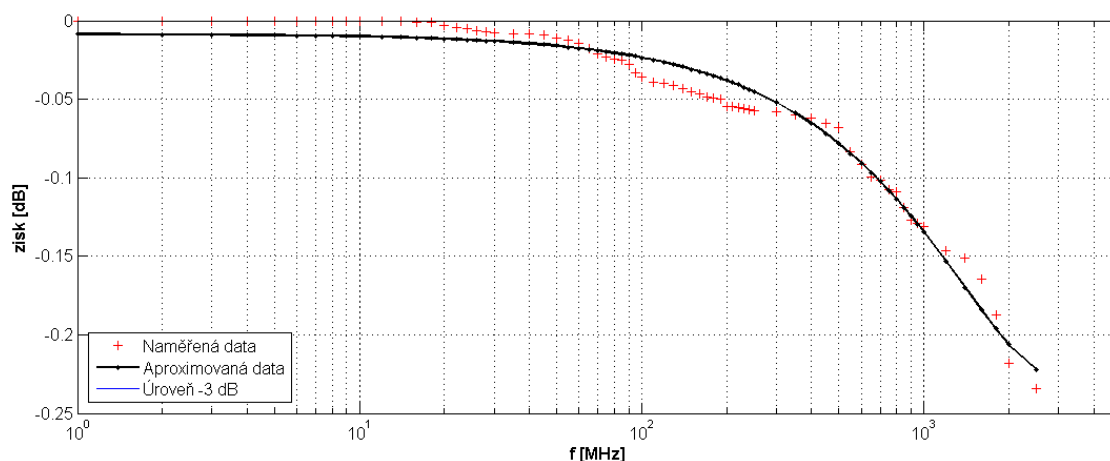
$$A = 20 \log \frac{U_1}{U} \quad (7.23)$$

kde  $U_1$  je analyzované napětí špička – špička a  $U$  je referenční hodnota napětí při frekvenci 200 kHz.



Obrázek 7.5: Frekvenční charakteristika soustavy LED u zadního světla Škoda Octavia III.

Frekvenční charakteristika LED Osram červená (typ: APT LR G6SP), která byla testována při 100 % výkonu, pracuje ve frekvenčním pásmu do 5,15 MHz, kdy došlo k poklesu o 3 dB.



Obrázek 7.6: Frekvenční charakteristika Bias-Tee ZX85-12G+

Frekvenční charakteristika součtového členu Bias-Tee ZX85-12G+ mohla být vzhledem k možnostem generátoru testována jen do frekvence 2,5 GHz, a tudíž se dle očekávání nepodařilo dosáhnout poklesu o 3 dB. Nemohlo tak být ověřeno celé pracovní frekvenční pásmo členu. Avšak pro naše účely je hodnota 2,5 GHz, vzhledem k frekvenční šířce pásma LED, dostačující.

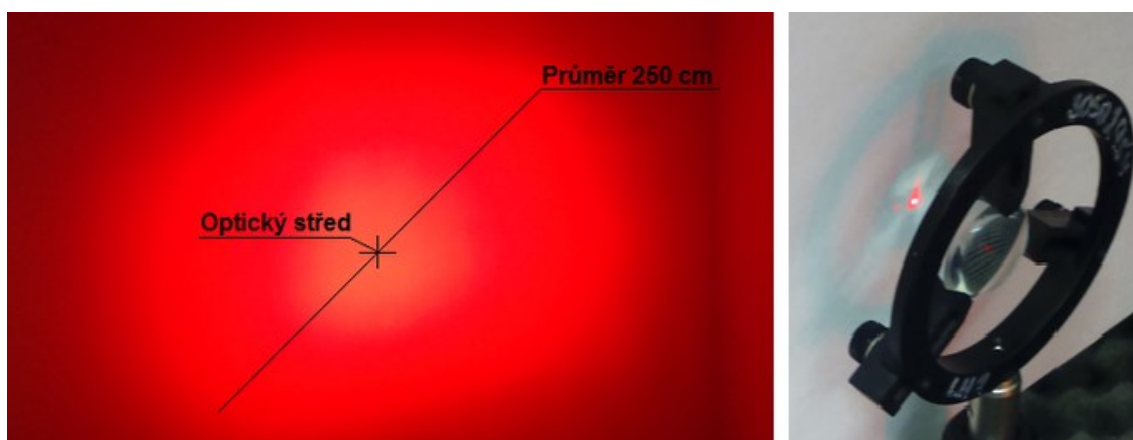
## 8 Realizace experimentu s využitím navrženého systému

Tato kapitola se zabývá analýzou digitálně modulovaných signálů, v závislosti na specifických požadavcích na přenos:

- vzdálenosti detektoru od optického zdroje,
- frekvenci modulovaného signálu,
- počtu přenesených symbolů za sekundu,
- počtu stavů modulace.

Měřené parametry, které byly uvedeny do tabulek (viz. příloha A) a grafů (viz. obr. kap. 9), jsou hodnoty MER a EVM, podle kterých je možné ohodnotit kvalitu přenosu optické bezvláknové komunikace. Dále byl při každé testovací modulaci zaznamenán vektorový a oko diagram pro každou měřenou nosnou frekvenci v závislosti na dané vzdálenosti.

Pro detekci optického signálu byl na přijímací straně umístěn detektor THORLABS PDF10A, který není z důvodu velmi malé plochy přijímacího čipu určen pro bezvláknovou optickou komunikaci příliš vhodný. Proto bylo nezbytné zařadit před tento čip optickou čočku, která fokusuje okolní paprsky přímo na střed čipu. Pro co nejlepší výsledky bylo nutné nastavit ohnisko čočky, pomocí předřadného papíru (viz. obr. 8.1).



Obrázek 8.1: *Fokusace optického paprsku u PCX čočky (vpravo) a světelná mapa brzdové funkce (vlevo).*

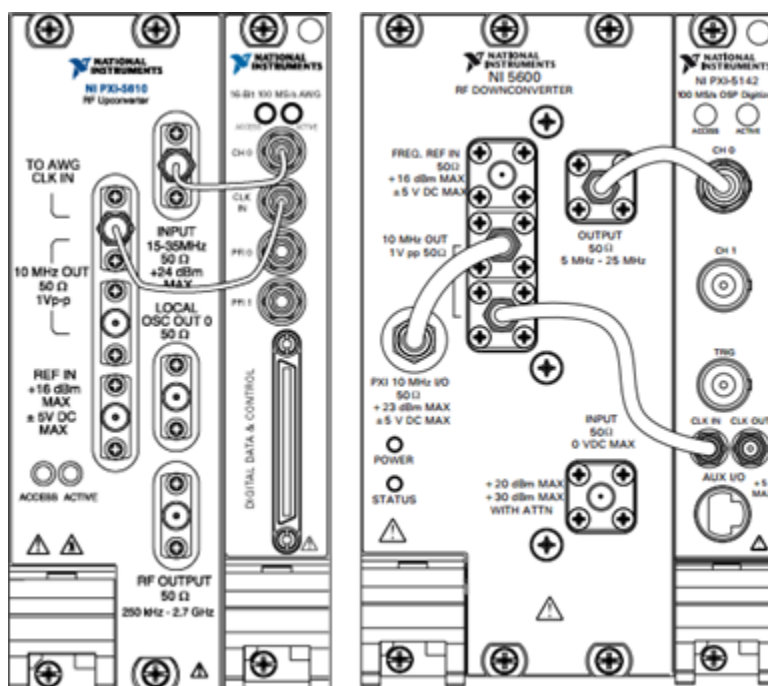
Nezbytným krokem bylo také fixovat zadní světlo do odpovídající pozice v automobilu a také nasměrovat světelné záření takovým směrem, aby bylo možné do jeho středu umístit detektor THORLABS PDF10A. Pro rozpoznání efektivní oblasti brzdové funkce, bylo světlo nasměrováno ze vzdálenosti 600 cm na bílou plochu, podle této světelné mapy (viz. obr. 8.1) jsem mohl určit optický střed a umístit do něj detektor.

## 8.1 Měřicí soustava

Hlavní část měřicí soustavy (viz obr. 8.2) je složena ze dvou PXI modulárních systémů. PXI modulární systém na levé části obrázku slouží jako signálový, vektorový generátor označení (PXI-5670), s hloubkou paměti až 512 MB a reálnou šířkou pásma 20 MHz. Modulární PXI systém na pravé straně slouží jako vektor signálový analyzátor (PXI-5661), který umožňuje rychlé měření digitálních modulovaných signálů, v pásmu 9 kHz – 2,7 GHz. Tyto přístroje jsou propojeny koaxiálním kabelem sloužícím jako přenosové médium. Signálový, vektorový analyzátor i generátor je možné ovládat vývojovým prostředím LabVIEW, doplněným o knihovnu Modulation Toolkit, která generuje a analyzuje potřebné signály. Analyzátor dále umožňuje vizualizaci několika výstupy: IQ, vektorový a oko diagram.

Signál vektorový generátor je složen z kontroléru (PXI-8196), generátoru libovolného průběhu (PXI-5421), který pracuje na maximální vzorkovací frekvenci 100MSps a modulů upkonvertoru (PXI-5601), který umožňuje vysílat data na požadované RF frekvenci, podle zvolené přenosové technologie, v rozmezí 250 kHz – 2,7 GHz.

Signál vektorový analyzátor je složen z kontroléru (PXI-8106), rychlého digitizéru (PXI-5142), který pracuje na maximální vzorkovací frekvenci 64 MSps a downkonvertoru (PXI-5600), který je omezen v pásmu 250 kHz – 2,7 GHz. Jeho úlohou je zpracování přijatého signálu na IF (15 MHz) [26][27].

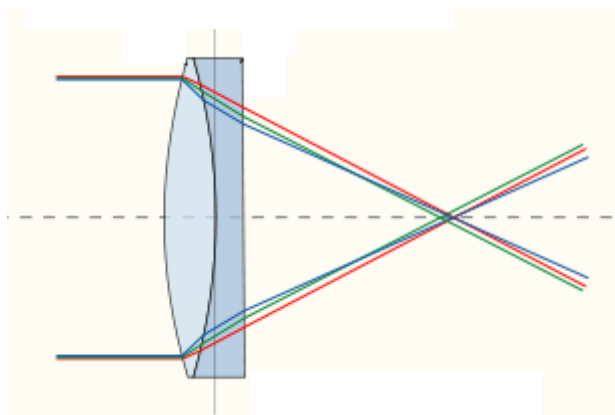


Obrázek 8.2: Zapojení signálového generátoru RF VSG NI PXI-5670 (NI PXI-5670 – RF Upconverter, NI PXI-5421 – 100 MS/s AWG) – vlevo [26] a zapojení signálového analyzátoru RF VSA NI PXI-5661 (NI PXI-5600 – RF Downconverter, NI PXI-5142 – 64 MS/s) - vpravo [27].



### 8.1.1 Plankonvexní (PCX) čočka

Pro co nejvíce efektivní využití přijímaného signálu jsem zvolil spojku, která mění vstupující svazek na sbíhavý, takže paprsky se za nimi protínají v bodě označovaném jako ohnisko. Konkrétně jsem využil plankonvexní čočku 45-504, ze sady Edmund optics, s antireflexivní povrchovou úpravou. Tato čočka je na přední straně vypuklá a na zadní rovinná, zároveň uprostřed vždy silnější než na okrajích. Efektivní ohnisková vzdálenost této čočky je 25 mm s průměrem 25 mm.



Obrázek 8.3: Průchod paprsků plankonvexní čočkou

## 8.2 Analýza modulací pomocí sofistikovaného softwaru LabVIEW 7

V rámci práce byly otestovány dva typy pokročilých modulačních formátů M-PSK a také M-QAM, podle blokového schématu zapojení (viz. obr. 8.4), při kterých byly stanovené přenosové parametry a šířka pásma. Modulace byly analyzované při konstantní teplotě v místnosti  $T_a = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a to vždy po uplynutí 30 minut po připojení hlavního napájení.



Obrázek 8.4: Blokové schéma měření modulací

Počátečním úkolem bylo nastavení vysílacího výkonu na výstupu generátoru. V tomto případě jsem zvolil základní amplitudovou modulaci ASK a výstup z generátoru připojil na osciloskop. Postupně jsem určoval výstupní výkon, který by se shodoval s pracovní oblastí komunikace. Jelikož jsem měřil na velkou vzdálenost, pro kterou nebyl daný fotodetektor určen, nastavil jsem na něm zesílení 20 dB a na analyzátoru -20 dB [26].

Testování přenosu informací, za pomoci optického záření, proběhlo u obou funkcí zadního světla využívající LED. Cílem bylo zjistit, zda kombinace obou spuštěných funkcí bude mít vliv na optickou komunikaci. Modulační koncept byl nejprve napojen na výkonnější brzdovou funkci, a v druhém měření na funkci obrysovou, využívající soustavu světlovodů. V posledním měření byl modulační koncept napojen na funkci brzdovou a současně byla aktivována nemodulovaná obrysová funkce, která působila jako parazitní světlo.

U všech třech druhů zapojení byly zkoumány změny vlivem:

- vzdálenosti na 0 cm, 200 cm, 400 cm a hraničních 600 cm, při konstantní symbolové rychlosti 100 kHz,
- nosné frekvence při 1 MHz, 3MHz, 5MHz a hraničních 11 MHz, při konstantní symbolové rychlosti 100 kHz,
- počtu stavů u 2,4,8,16-PSK a 4,8,16,32,64,128,256-QAM, při konstantní symbolové rychlosti 100 kHz,
- symbolové rychlosti v rozmezí 0 kHz – 4,7 MHz.

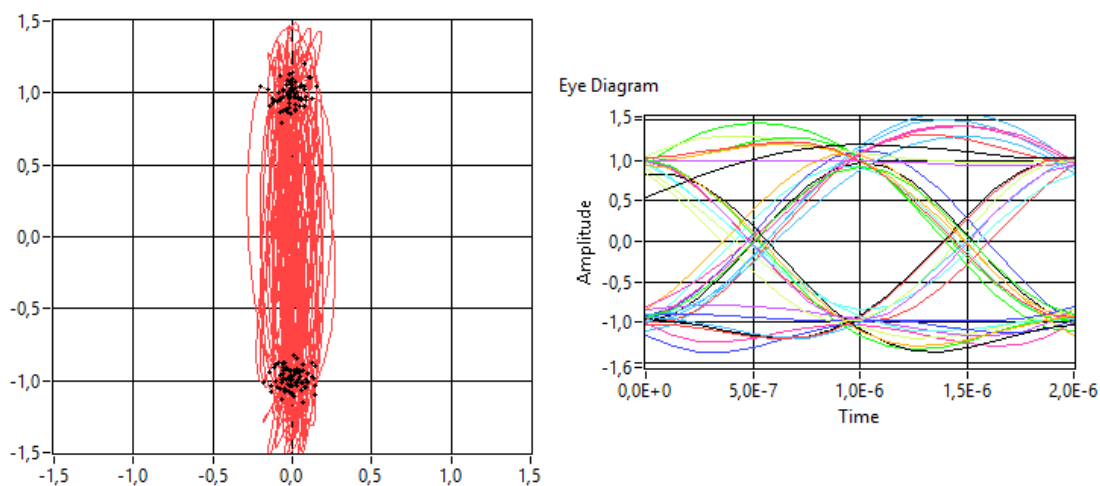
Výše zmíněné parametry bylo možné regulovat v uživatelském rozhraní generátoru a následně současně nastavit i na analyzátoru. Pro tento experiment byly podstatné následující bloky:

- Center Frequency – frekvence nosné vlny,
- Power Level – výstupní výkon,
- Symbol Rate – symbolová rychlost,
- Samples per Symbol – počet vzorků na symbol,
- M-PSK/M-QAM – určuje stavovou modulaci.

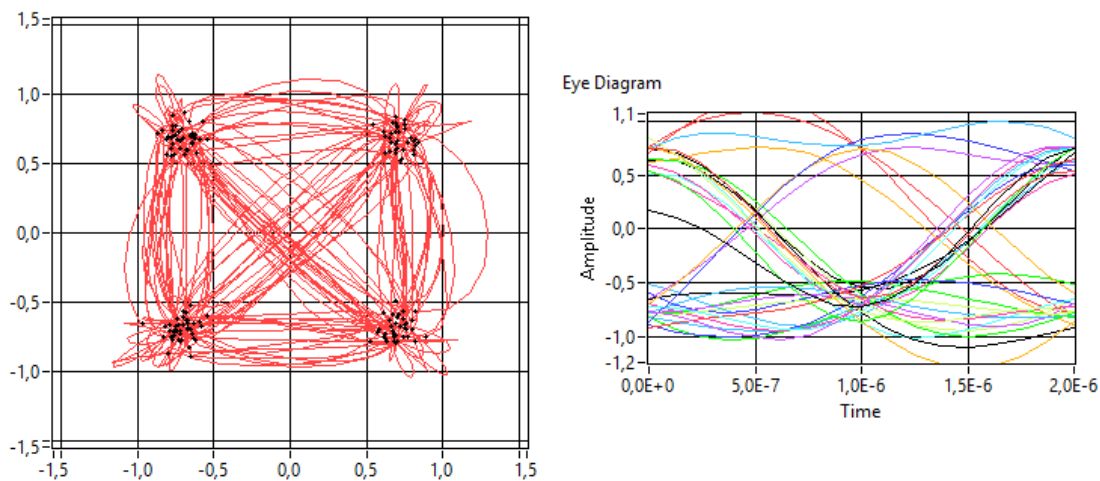


### 8.3 PSK klíčování

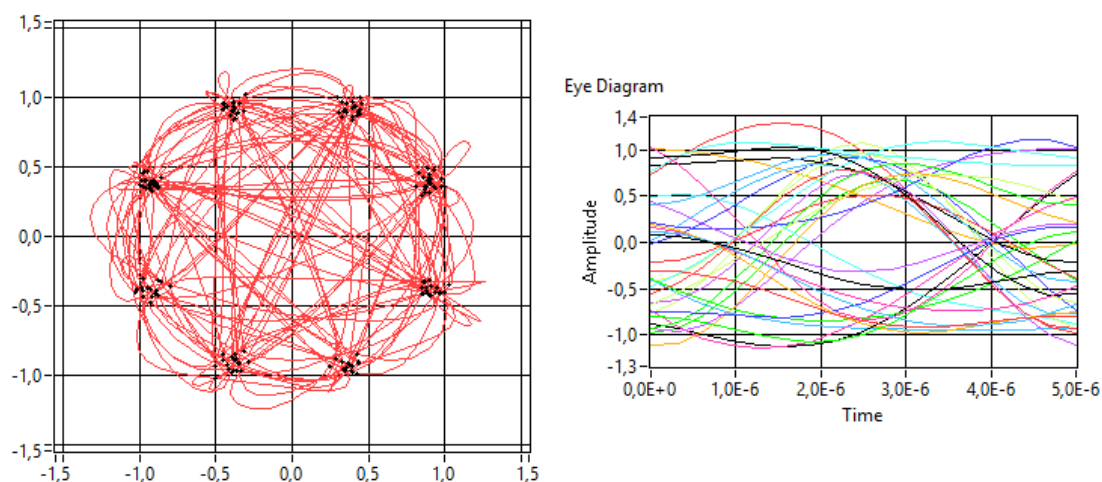
Testování vícestavových modulací M-PSK bylo realizované s využitím modulace BPSK, QPSK, 8-PSK a 16-PSK u brzdové funkce zadního světla Škoda Octavia III.



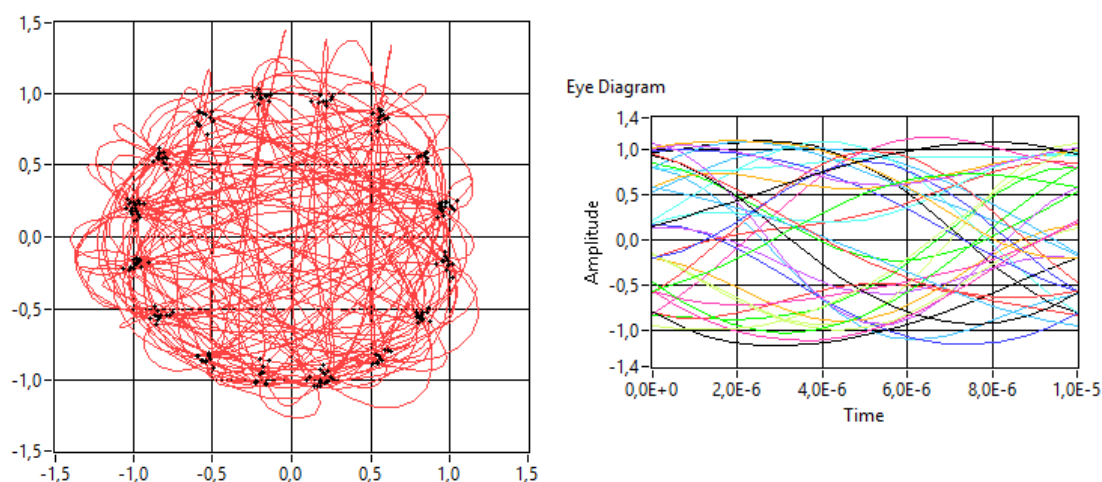
Obrázek 8.5: *Vektorový diagram (vlevo) a oko diagram (vpravo) modulace BPSK při nosné frekvenci 1 MHz a referenční vzdálenosti 200 cm*



Obrázek 8.6: *Vektorový diagram (vlevo) a oko diagram (vpravo) modulace QPSK při nosné frekvenci 1 MHz a referenční vzdálenosti 200 cm*



Obrázek 8.7: Vektorový diagram (vlevo) a oko diagram (vpravo) modulace 8-PSK při nosné frekvenci 1 MHz a referenční vzdálenosti 200 cm



Obrázek 8.8: Vektorový diagram (vlevo) a oko diagram (vpravo) modulace 16-PSK při nosné frekvenci 1 MHz a referenční vzdálenosti 200 cm

Kompletní zpracované výsledky všech měřených variant, včetně diagramu rozpadů komunikace při hraniční frekvenci a vzdálenosti, jsou uvedeny v příloze (viz. DVD p. č. 1 a 2). V grafu (viz. obr. 8.5 – 8.8) jsou vyobrazeny diagramy při symbolové konstantní rychlosti 100 kHz se střední referenční vzdálenosti 200 cm.

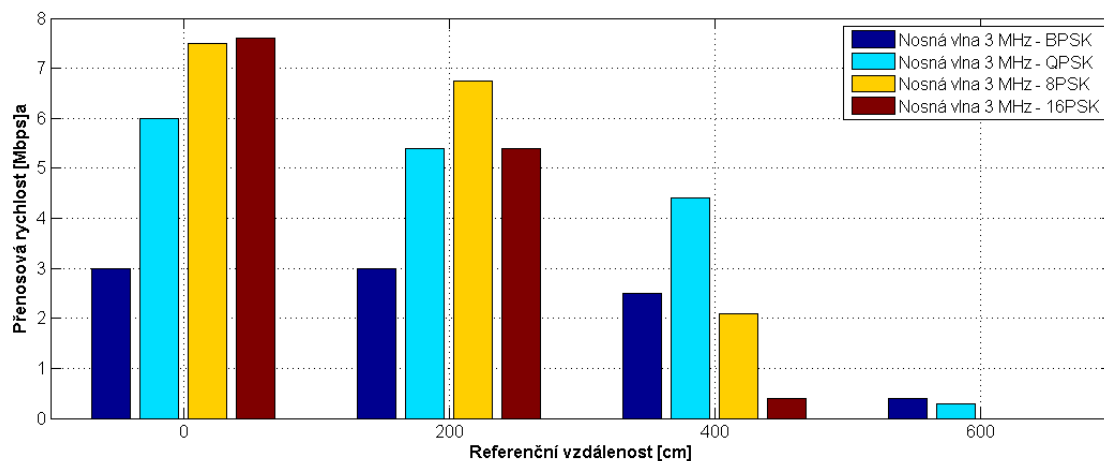
Vyhodnocení jednotlivých variant měření z pohledu kvality přenosu, bylo realizované na základě stupně rozpadu vektorového a oka diagramu, což se projevovalo splynutím jednotlivých stavů nebo úplného rozpadu diagramů. Zhoršení kvality přenosu se začalo projevovat od vzdálenosti 400 cm, avšak i při hraniční vzdálenosti 600 cm, byl systém schopný

komunikovat u všech stavů PSK. Hranice výpadku komunikace byla zaznamenána při nosné frekvenci 11 MHz, ve vzdálenosti od 200 cm.

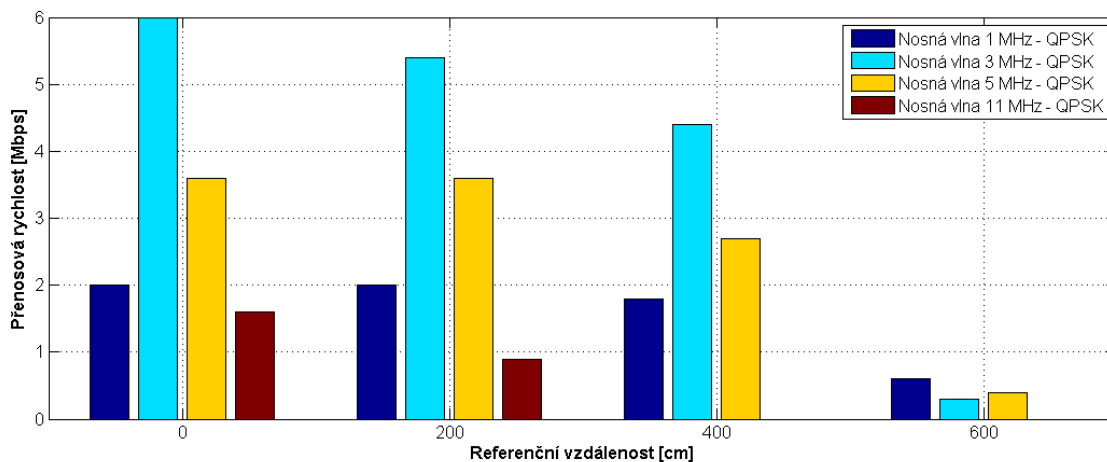
### 8.3.1 Přenosová rychlost M-PSK

Přenosová rychlost byla vypočítána na základě symbolové rychlosti (viz. rovnice 6.14), kterou bylo možné ovlivňovat v prostředí generátoru. Maximální možná symbolová rychlost byla omezena nosnou frekvencí podle Shannon-Kotelnikova teorému, který říká, že frekvence vzorkování musí být alespoň 2 krát vyšší, než nejvyšší kmitočty (spektrální složky) vzorkovaného signálu, aby nedošlo ke zkreslení přeložením spekter.

Kompletní zpracované výsledky všech měřených variant jsou uvedeny v příloze (viz. Příloha A). V grafu (viz. obr. 8.9) jsou vyobrazeny maximální dosažené přenosové rychlosti, všech stavů PSK, při nosné frekvenci 3 MHz a graf (viz. obr. 8.10) vyobrazující maximální možné přenosové rychlosti QPSK v závislosti na měřených nosných frekvencích.



Obrázek 8.9: Analyzované přenosové rychlosti M-PSK modulací při nosné frekvenci 3 MHz

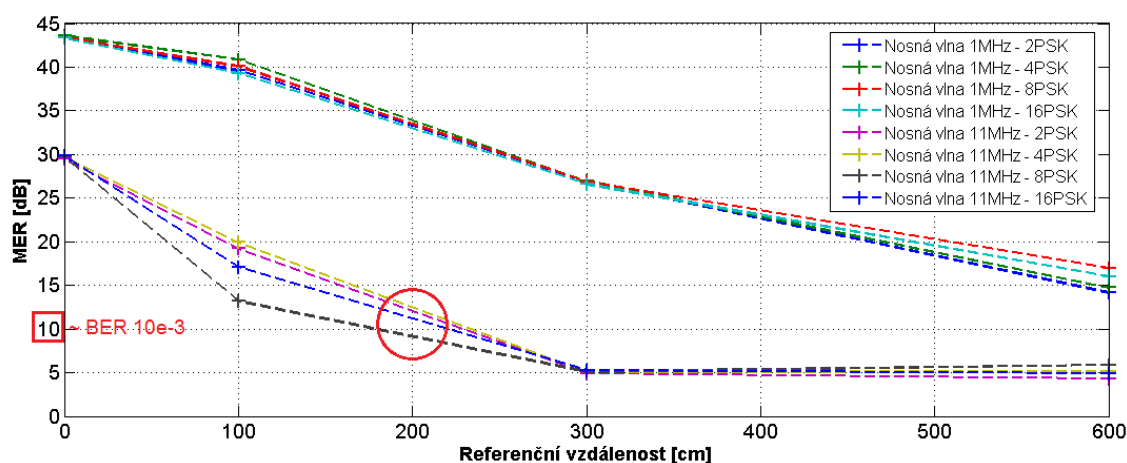


Obrázek 8.10: Analyzované přenosové rychlosti QPSK modulace při nosných frekvencích 1 MHz – 11 MHz.

Na základě dosažených výsledků je zřetelné, že nejvyšších přenosových rychlostí dosahovaly vícecestavové modulace s vyšším počtem stavů, a to nejlépe při nosné frekvenci 3 MHz. Konkrétně u 8-PSK a 16-PSK, kde byla naměřena rychlost 7,6 Mbps. Avšak z hlediska stability přenosové rychlosti vlivem vzdálenosti se ukázala jako nejlepší modulace QPSK.

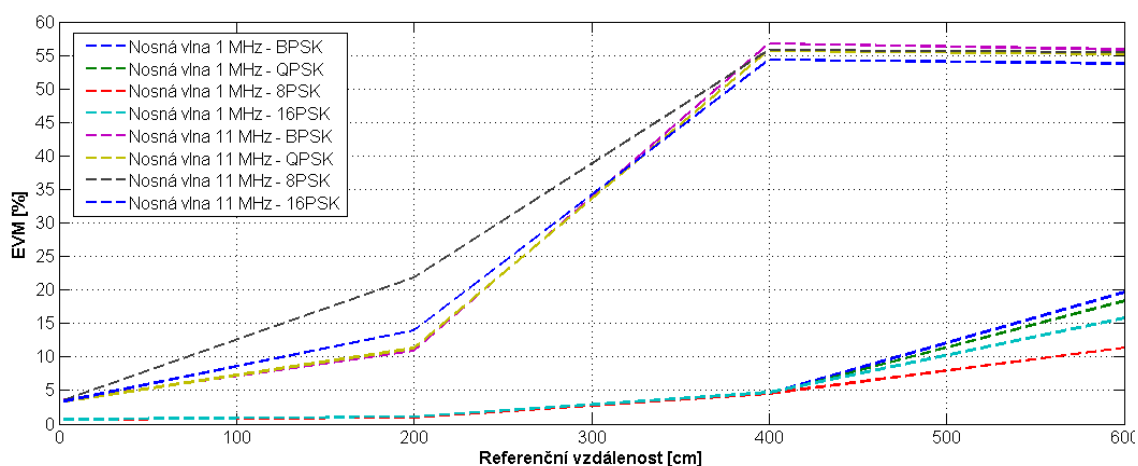
### 8.3.2 Chybovost M-PSK

V poslední variantě testování chybovosti byly zaznamenávány hodnoty parametru MER a EVM, vzhledem k jednotlivým nosným frekvencím a referenčním vzdálenostem. Kompletní zpracované výsledky všech měřených variant jsou uvedeny v příloze (viz. příloha A).



Obrázek 8.11: Porovnání parametrů MER u M-PSK při nosné frekvenci 1 MHz a 11 MHz

V grafu (viz. obr. 8.11) porovnávám parametr modulační chyby MER s rostoucí referenční vzdáleností u všech stavů PSK při nosné frekvenci 1 MHz, který je takřka totožný s dalšími naměřenými nosnými frekvencemi 3 MHz a 5 MHz, které tedy pro přehlednost v grafu vynechávám. Oproti těmto výsledkům, které mohou komunikovat v celé měřené oblasti, a tudíž se nedostávají pod hranici  $\text{BER} = 10^{-3}$ , se při nosné frekvenci 11 MHz ve vzdálenosti 200 cm komunikace rozpadá.



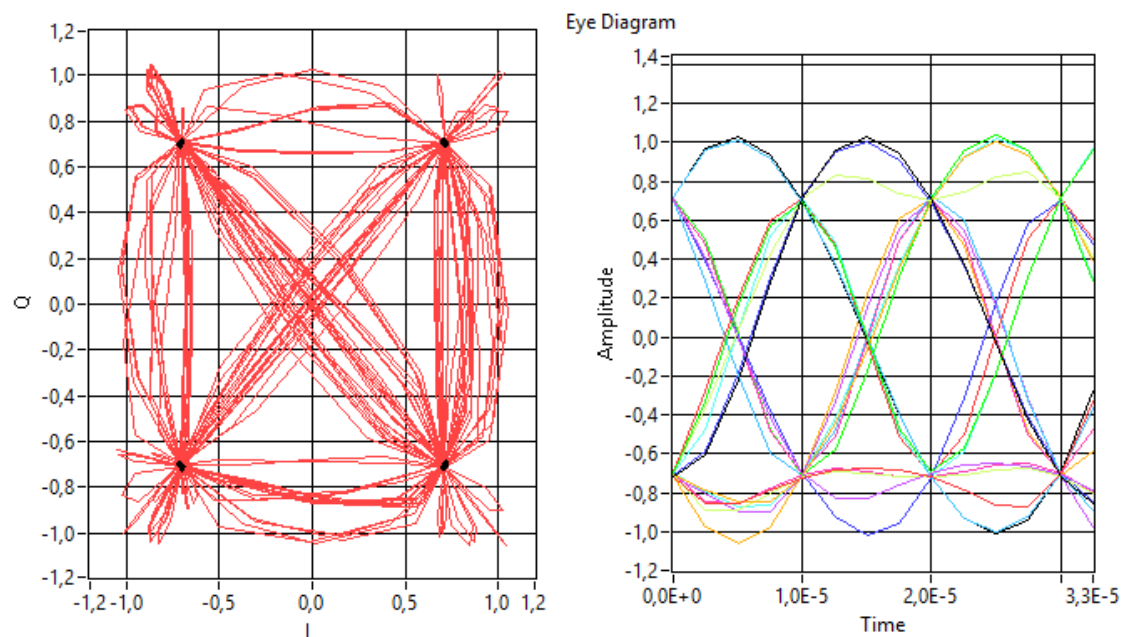
Obrázek 8.12: Porovnání parametrů EVM u M-PSK při nosné frekvenci 1 MHz a 11 MHz

V grafu (viz. obr. 8.12) porovnávám parametr amplitudy chybového vektoru EVM s rostoucí referenční vzdáleností u všech stavů PSK při nosné frekvenci 1 MHz. I tento graf vykazuje stejné závěry, jako tomu bylo u parametru MER.

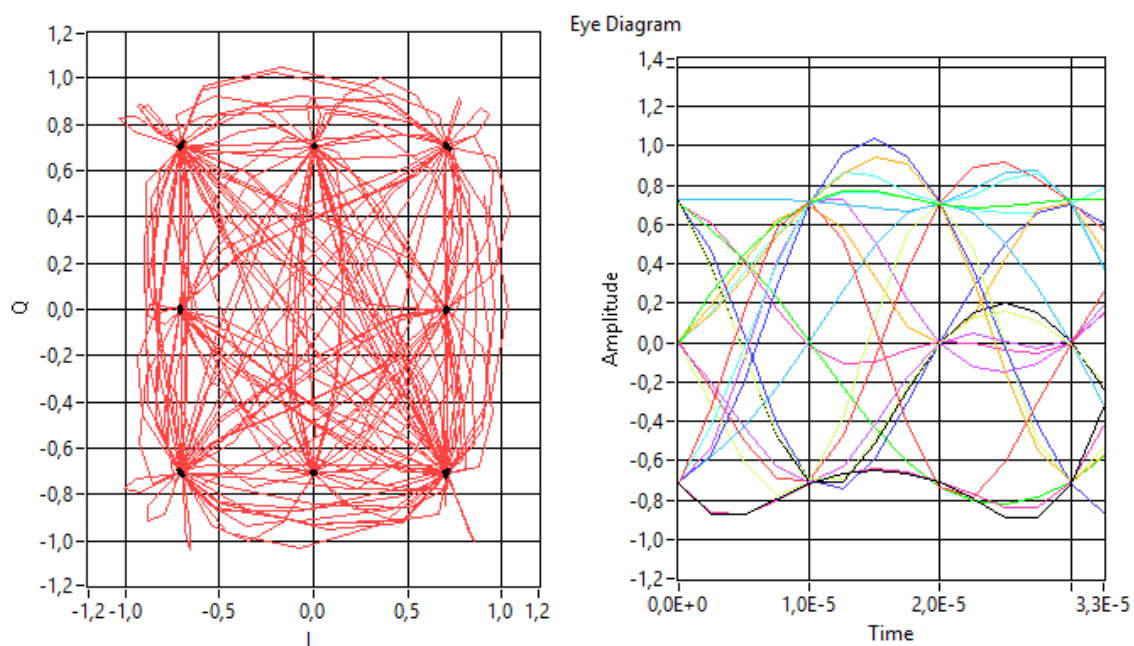
Nasazení systému u obrysové funkce a snaha tento prvek modulovat se nezdařila. I při nejideálnějších podmínkách testování, tedy při nosné frekvenci 1 MHz ve vzdálenosti 0 cm, spolu s nejzákladnější BPSK modulací neprojevil jakýkoliv náznak komunikace. I v oblasti testu na zarušení komunikace pomocí brzdivé funkce, vlivem svitu funkce obrysové, se neprojevila. Můžeme tedy říct, že obrysová funkce nemá jakýkoliv vliv na optickou komunikaci. V tomto případě je zbytečné pokračovat v testování obrysové funkce u dalších typů modulace.

## 8.4 QAM modulace

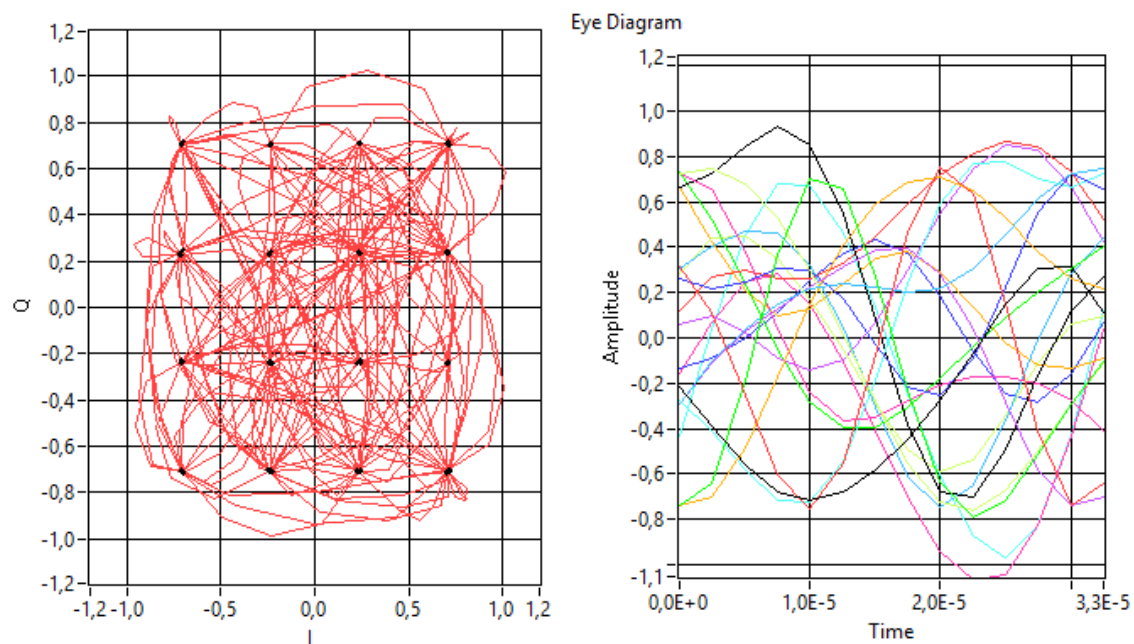
Testování vícestavových modulací M-QAM bylo realizované s využitím těchto modulací: 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM, 64-QAM, 128-QAM a 256-QAM u brzdivé funkce zadního světla Škoda Octavia III.



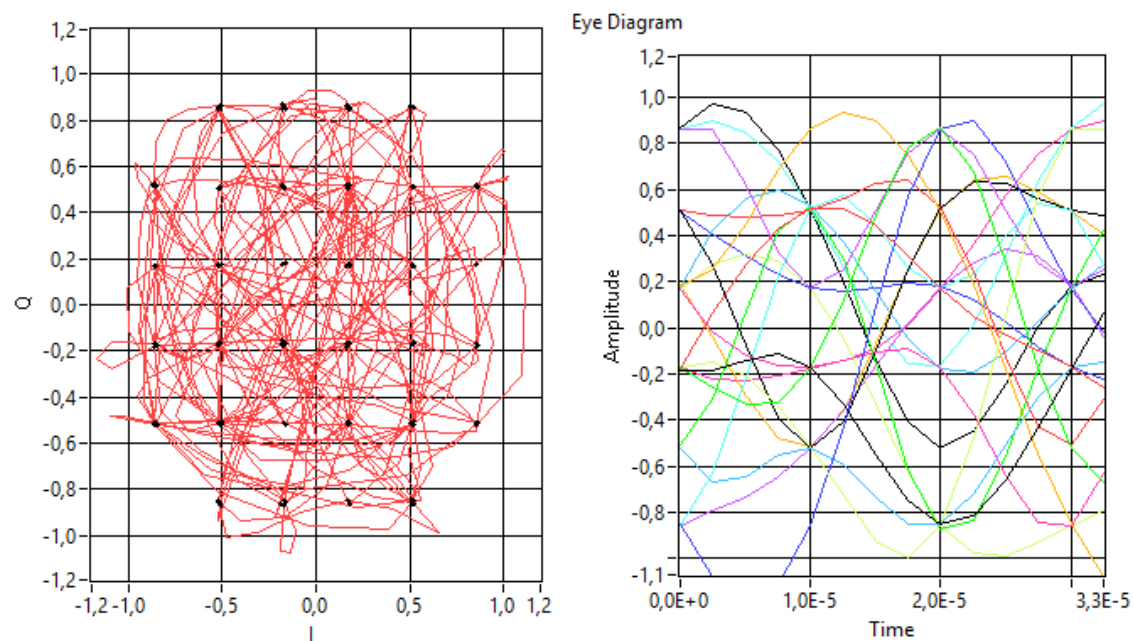
Obrázek 8.13: Vektorový diagram (vlevo) a oko diagram (vpravo) modulace 4-QAM při nosné frekvenci 1 MHz a referenční vzdálenosti 200 cm



Obrázek 8.14: Vektorový diagram (vlevo) a oko diagram (vpravo) modulace 8-QAM při nosné frekvenci 1 MHz a referenční vzdálenosti 200 cm

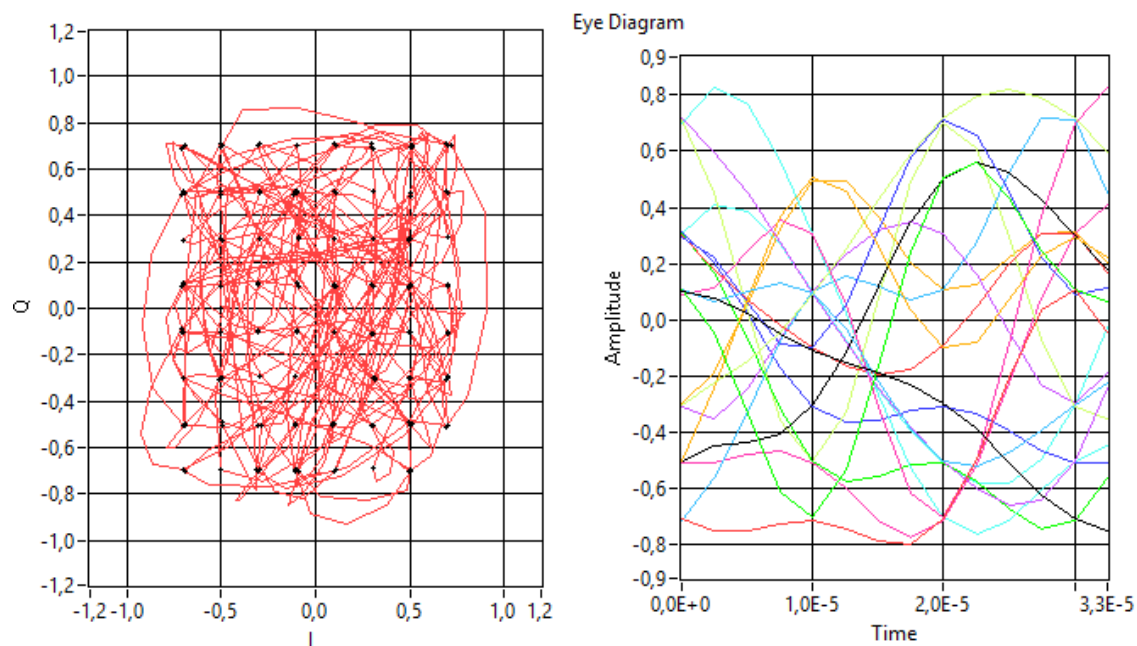


Obrázek 8.15: Vektorový diagram (vlevo) a oko diagram (vpravo) modulace 16-QAM při nosné frekvenci 1 MHz a referenční vzdálenosti 200 cm

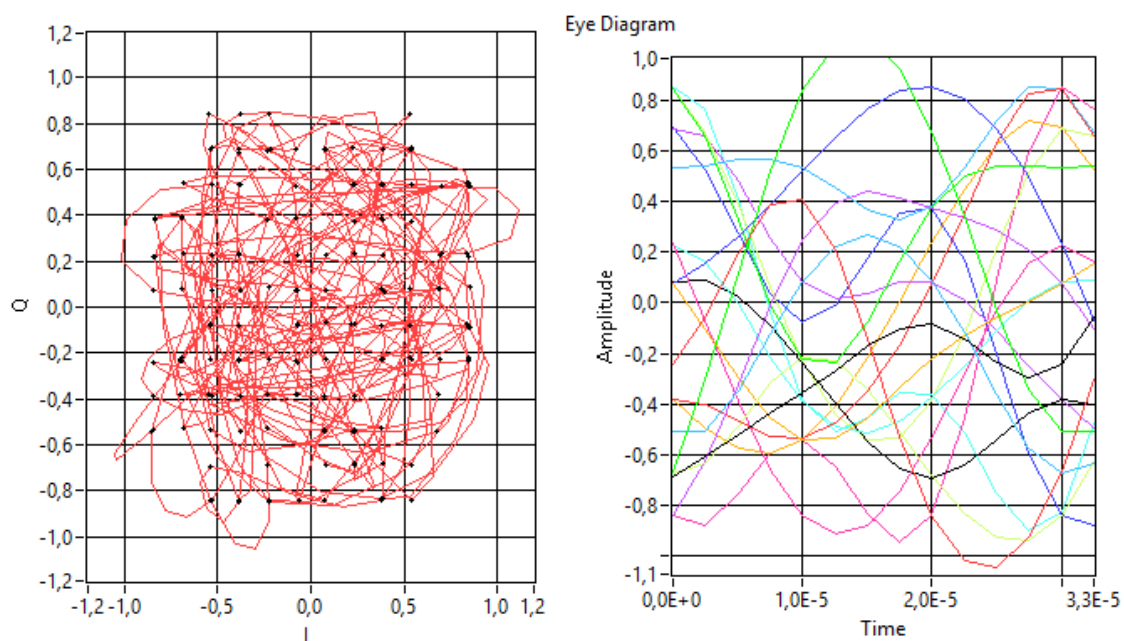


Obrázek 8.16: Vektorový diagram (vlevo) a oko diagram (vpravo) modulace 32-QAM při nosné frekvenci 1 MHz a referenční vzdálenosti 200 cm



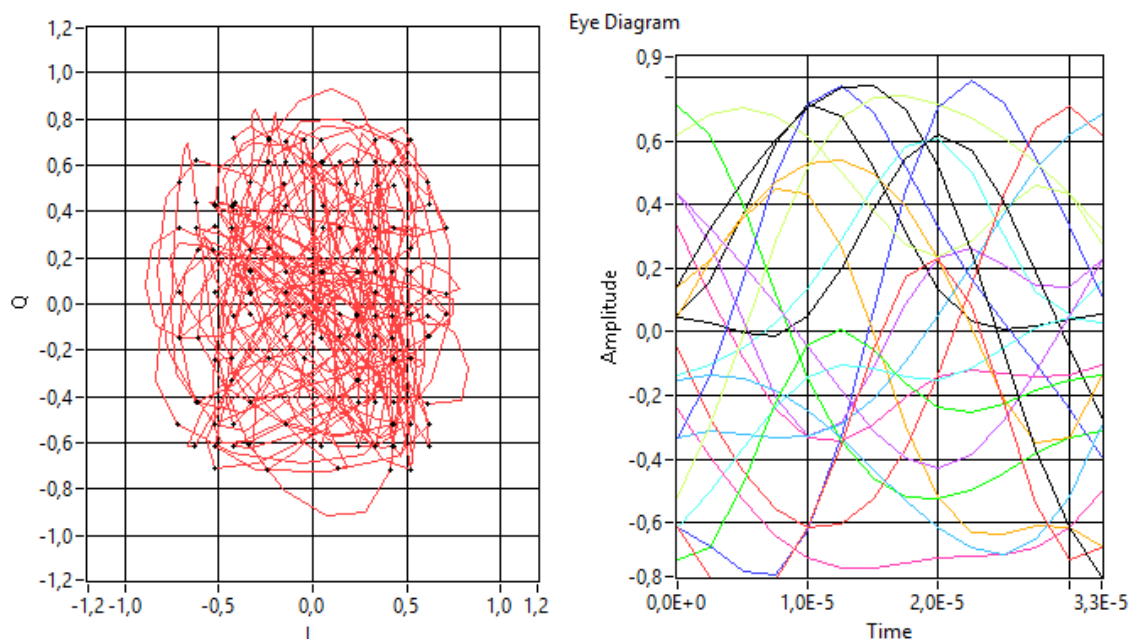


Obrázek 8.17: Vektorový diagram (vlevo) a oko diagram (vpravo) modulace 64-QAM při nosné frekvenci 1 MHz a referenční vzdálenosti 200 cm



Obrázek 8.18: Vektorový diagram (vlevo) a oko diagram (vpravo) modulace 128-QAM při nosné frekvenci 1 MHz a referenční vzdálenosti 200 cm





Obrázek 8.19: Vektorový diagram (vlevo) a oko diagram (vpravo) modulace 256-QAM při nosné frekvenci 1 MHz a referenční vzdálenosti 200 cm

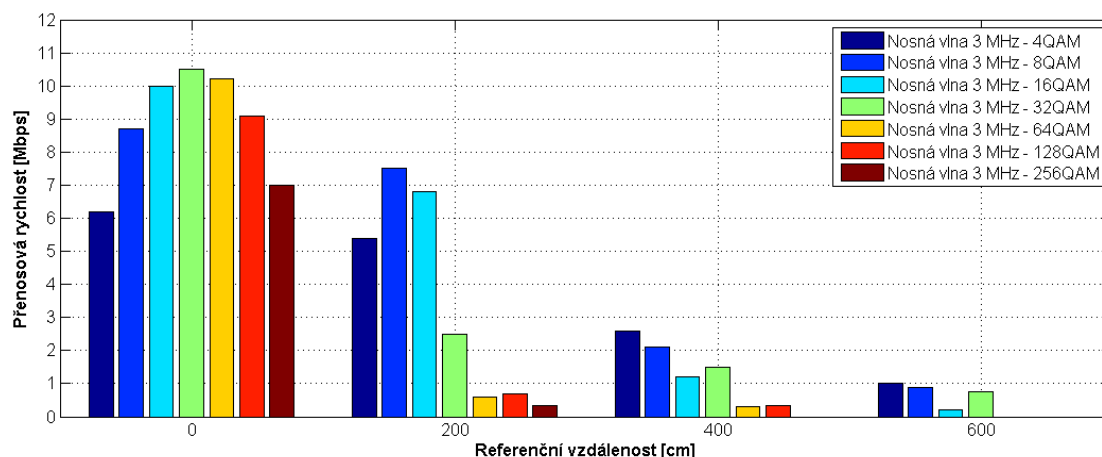
Kompletní zpracované výsledky všech měřených variant, včetně diagramu rozpadů komunikace při hraniční frekvenci a vzdálenosti, jsou uvedeny v příloze (viz. DVD p. č. 3,4). V grafu (viz. obr. 8.16 – 8.19) jsou vyobrazeny diagramy při symbolové konstantní rychlosti 100 kHz se střední referenční vzdáleností 200 cm.

Vyhodnocení jednotlivých variant měření z pohledu kvality přenosu, bylo opět realizované na základě stupně rozpadu vektorového a oka diagramu. Zhoršení kvality přenosu se začalo projevovat od vzdálenosti 200 cm, avšak i při hraniční vzdálenosti 600 cm byl systém schopný komunikovat do 32-QAM. Hranici výpadku komunikace jsem zaznamenal při nosné frekvenci 5 MHz a 11 MHz ve vzdálenosti od 100 cm.

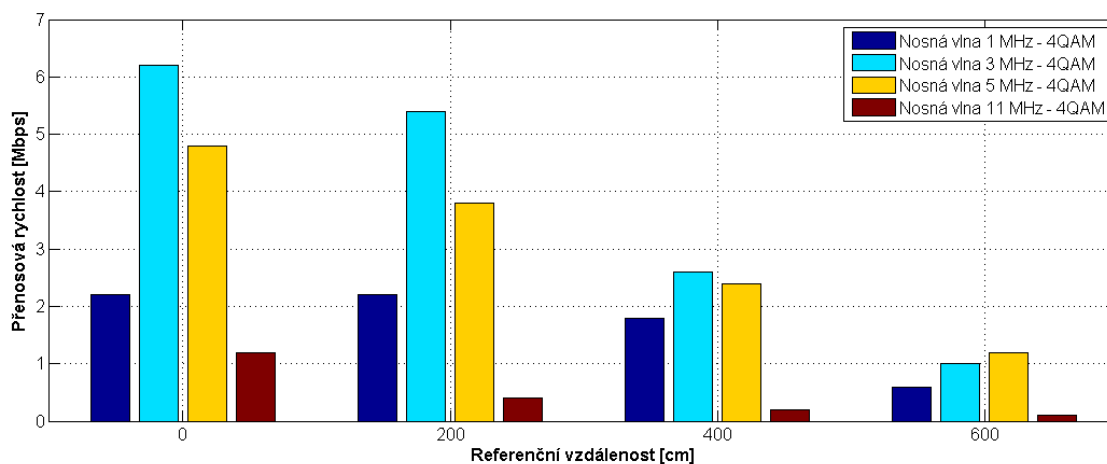
#### 8.4.1 Přenosová rychlost M-QAM

Přenosová rychlost byla vypočítána na základě symbolové rychlosti (viz. rovnice 6.18), kterou bylo možné ovlivňovat v uživatelském prostředí generátoru. Maximální možná symbolová rychlost byla omezena nosnou frekvencí podle Shannon-Kotelnikova teorému.

Kompletní zpracované výsledky všech měřených variant jsou uvedeny v příloze (viz. příloha A). V grafu (viz. obr. 8.20) jsou vyobrazeny maximální dosažené přenosové rychlosti všech stavů QAM, při nosné frekvenci 3 MHz a graf (viz. obr. 8.21) vyobrazující maximální možné přenosové rychlosti 4-QAM v závislosti na měřených nosných frekvencích.



Obrázek 8.20: Analyzované přenosové rychlosti M-QAM modulací při nosné frekvenci 3 MHz.

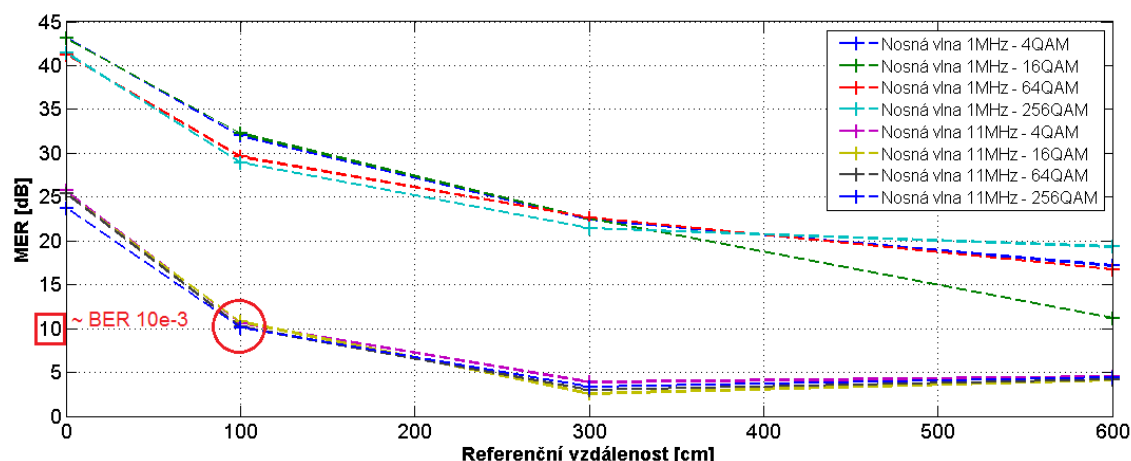


Obrázek 8.21: Přenosové rychlosti 4-QAM modulace při nosných frekvencích 1 MHz – 11 MHz.

Na základě dosažených výsledků je zřejmé, že nejvyšších přenosových rychlostí dosahovaly vícecestavové modulace s vyšším počtem stavů, a to nejlépe při nosné frekvenci 3 MHz. Konkrétně u 16-QAM, 32-QAM a 64-QAM, kde byla naměřena rychlost nad 10 Mbps. Avšak z hlediska stability se přenosové rychlosti vlivem vzdálenosti ukázaly opět jako nejlepší modulace nižších stavů a to především do 8-QAM. Přenosová rychlost u vyššího počtu stavů rychle klesá.

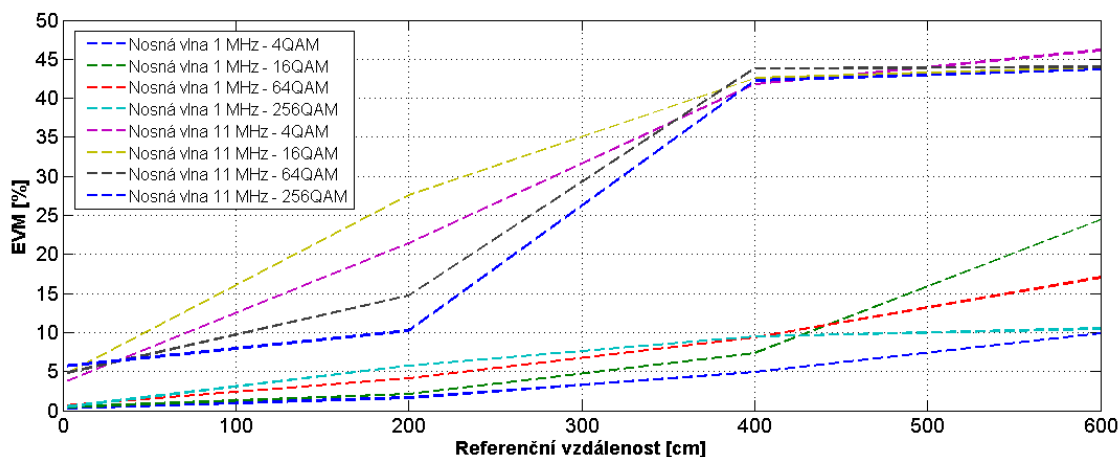
#### 8.4.2 Chybovost M-QAM

V poslední variantě testování chybovosti byly zaznamenávány hodnoty parametru MER a EVM vzhledem k jednotlivým nosným frekvencím a referenčním vzdálenostem. Kompletní zpracované výsledky všech měřených variant jsou uvedeny v příloze (viz. příloha A).



Obrázek 8.22: Porovnání parametru MER u vybraných M-QAM při nosné frekvenci 1 MHz a 11 MHz

V grafu (viz. obr. 8.22) porovnávám parametr modulační chyby MER s rostoucí referenční vzdáleností u vybraných stavů QAM, při nosné frekvenci 1 MHz, který se opět projevil takřka totožný s dalšími měřeními nosnými frekvencemi 3 MHz a 5 MHz, které tedy pro přehlednost v grafu vynechávám. Dále pro lepší orientaci vyobrazuji jen některé stavy QAM, jelikož zbývající nezobrazené mají stejnou tendenci a charakter. Oproti těmto výsledkům, které mohou komunikovat v celé měřené oblasti a nedostávají se tedy pod hranici  $\text{BER} = 10^{-3}$ , se při nosné frekvenci 11 MHz ve vzdálenosti 100 cm komunikace rozpadá.



Obrázek 8.23: Porovnání parametru EVM u vybraných M-QAM při nosné frekvenci 1 MHz a 11 MHz

V grafu (viz. obr. 8.23) porovnávám parametr amplitudy chybového vektoru EVM s rostoucí referenční vzdáleností u vybraných stavů QAM při nosné frekvenci 1 MHz. I tento graf vykazuje stejné závěry, jako tomu bylo u parametru MER.

## 9 Vyhodnocení fotometrických veličin a homogenity při použití pokročilých modulačních formátů

Zjištění fotometrických veličin a homogenity vyzařovaného optického záření u obou funkcí zadního světla Škoda Octavia III. bylo prováděno firmou Varroc Light Systém s.r.o. V páté kapitole bylo zadní světlo podstoupeno měření bez modulátoru, kde výsledky fotometrie a homogenity splňovaly předpis ECE.

V tomto závěrečném měření došlo k identickému testování, nýbrž tentokrát s integrovaným systémem, který byl zdrojem komunikace. Tato pseudonáhodná komunikace byla modulována pomocí generátoru PXI-5670, nejefektivnější možnou variantou z testovaných v kapitole 8. Na základě dosažených výsledků byla tedy použita 32 - stavová QAM modulace, při frekvenci 3 MHz, která stabilně dosahovala nejvyšší přenosové rychlosti s malou chybovostí. Rozdíl těchto výsledků by měl být v ideálním případě nulový, pokud by se tak nestalo, nesměli by hodnoty pro splnění předpisu ECE klesnout pod definovanou hranici.

Fotometrické měření obou funkcí využívající LED u zadního světla Škoda Octavia III., bylo pro relevantní výsledky realizováno stejným způsobem jako v předchozím měření tohoto typu (viz. obr. 5.9). Při porovnání protokolů intenzit v jednotlivých měřících bodech světla, před a po integraci systému (viz. tab. 9.1 a 9.2), nedošlo k výrazné změně v žádném měřeném bodě. Tedy všechny měřené body, u obou funkcí, splňují požadavek o několik řádů více, než požaduje předpis ECE. Isocandelové mapy jsou uvedeny v příloze (viz. DVD p.č. 29 a 30)

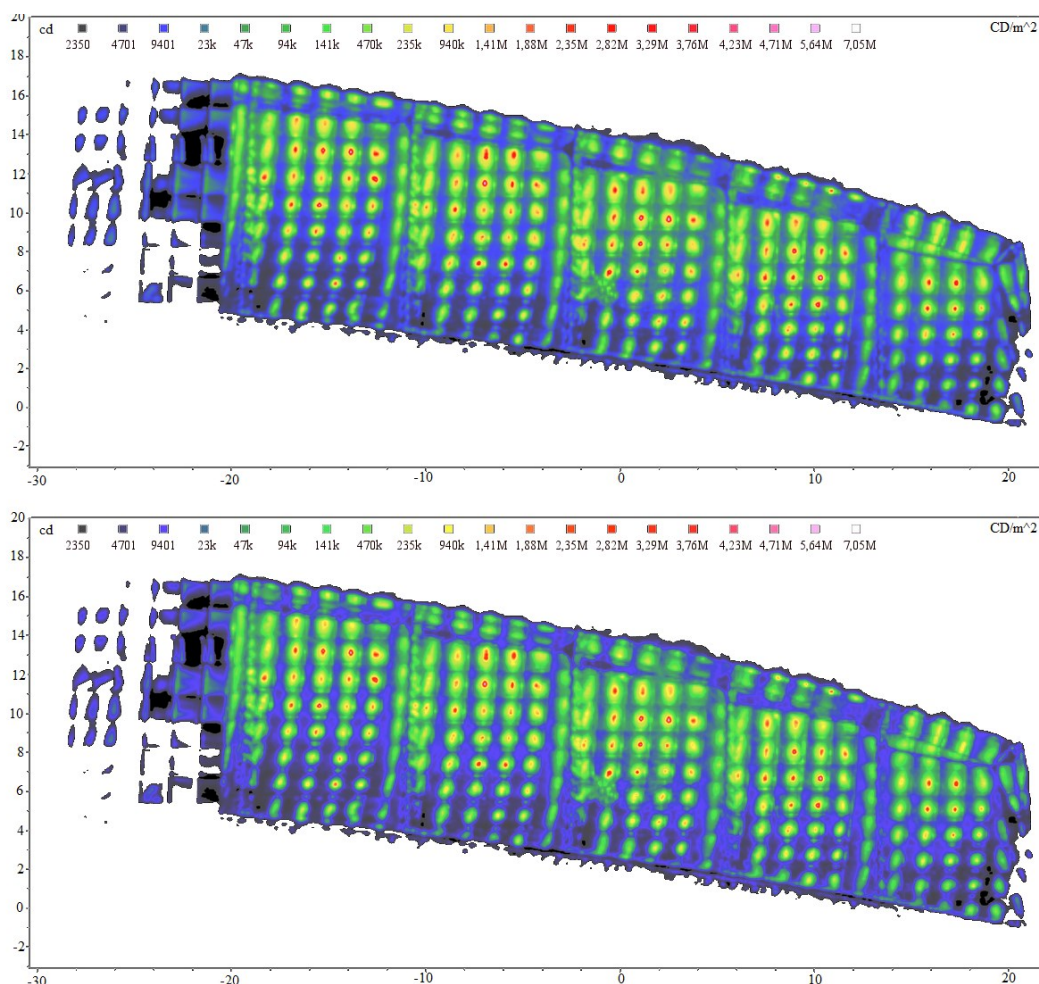
Tabulka 9.1: *Protokol intenzit v testovaných měřících bodech brzdivé funkce Octavia III.*

Funkce	H	V	Min	Max	Modulace		Rozdíl
					Ne	Ano	
-	[°]	[°]	[cd]	[cd]	[cd]	[cd]	[cd]
Po 1 minutě							
H - V	0,00°	0,00°	60	260	169,9	173	3,1
Po 30 minutách							
H - V	0,00°	0,00°	60	260	147,7	150	2,3
5U – 20L	-20,00°	5,00°	6	260	15,19	24,7	9,51
5D – 20L	-20,00°	-5,00°	6	260	19,89	26,5	6,61
5D – 10L	-10,00°	-5,00°	12	260	78,11	98	19,89
H – 10L	-10,00°	0,00°	21	260	74,41	108	33,59
5U – 10L	-10,00°	5,00°	12	260	47,31	91,1	43,79
10U – 5L	-5,00°	10,00°	12	260	34,78	87,5	52,72
H – 5L	-5,00°	0,00°	54	260	115,9	152	36,1
10D – 5L	-5,00°	-10,00°	12	260	86,8	49,4	-37,4
5D – V	0,00°	-5,00°	42	260	150,2	122	-28,2
5U – V	0,00°	5,00°	42	260	123,3	139	15,7

Vyhodnocení fotometrických veličin a homogenity při použití pokročilých modulačních formátů

10U -5R	5,00°	10,00°	12	260	55,22	79,6	24,38
H - 5R	5,00°	0,00°	54	260	132,3	125	-7,3
10D - 5R	5,00°	-10,00°	12	260	68,01	23,9	-44,11
5D - 10R	10,00°	-5,00°	12	260	95,7	51,3	-44,4
H - 10R	10,00°	0,00°	21	260	103,3	83,7	-19,6
5U - 10R	10,00°	5,00°	12	260	14,12	77,4	63,28
5U - 20R	20,00°	5,00°	6	260	88,8	8,06	-80,74
5D - 20R	20,00°	-5,00°	6	260	16,62	6,89	-9,73
Viditelnost	(45,00°) 0,25°	(15,00°) 3,00°	0,3	260	(0,88) 260	(0,81) 260	(0,07) 260

Poměrově nejvyšší pokles intenzity u brzdogvé funkce se je v bodě 5U – 20R = 8,06 cd. Tato hodnota je však stále v normovaném rozsahu 6 cd – 260 cd, tudíž splňuje podmínky na 134 %. Hodnota WinFlux, což je světelný tok ve zobrazeném okně poklesl jen o 1,3 lm.



Obrázek 9.1: Jasová mapa brzdogvého světla bez systému (nahore), se systémem (dole)

## Vyhodnocení fotometrických veličin a homogenity při použití pokročilých modulačních formátů

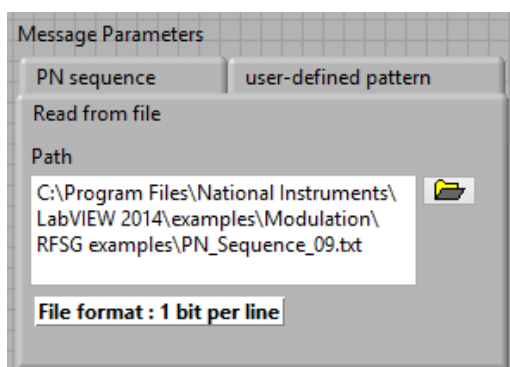
Při srovnání výsledků homogenity, na základě jasové mapy (viz. obr. 9.1 a 9.2), taktéž nedošlo k žádné změně. Výsledný poměr mezi nejslabším a nejsilnějším bodem brzdové a obrysové funkce, je v oblasti tolerance zakázky a splňuje tedy podmínky homogenity.

V posledním měření bylo cílem zjistit zda - li dojde k poklesu optického výkonu, při změně nosné frekvence a typu modulačního formátu. Pokud by se tak stalo a optický výkon poklesl o větší míru významnosti, čímž by se dostal pod hranici předpisu ECE, musela by být příslušná varianta (kombinace nosné frekvence a typ modulace) vyřazena a označena za nevhodnou.

Experimentální pracoviště bylo analogické, s měřením P-I charakteristiky (viz. obr. 5.3). V první fázi bylo analyzováno kolísání optického výkonu při změně nosné frekvence u obou funkcí využívající LED a ve fázi druhé byl změněn typ modulace. Analýza u všech variant měření proběhla vždy po 30 minutách v temné místnosti. Každý typ modulace byl otestován při nosné frekvenci, v rozmezí 1 MHz – 11 MHz, při všech možných stavech modulace, které prostředí LabVIEW nabízí, všechny jsou uvedeny v předchozí kapitole.

Pro vyhodnocení jsem výsledky tohoto měření porovnal s původním optickým výkonem, tedy bez použití modulačního systému. Na základě těchto údajů mohu stanovit, že nedošlo u žádné z funkcí k výraznému poklesu, a to ani u jedné z měřených variant. Všechny použité modulace M-PSK a M-QAM, při nosné frekvenci v rozmezí 1 MHz – 11 MHz, vykazují nulový pokles optického výkonu a nemají tedy žádný vliv na brzdovou nebo obrysovou funkci.

Po celou dobu měření byla použita pseudonáhodná kombinace bitu. Tato možnost byla vybrána v kartě PN sequence (viz. obr. 9.3) Pro zjištění vlivu posloupnosti jednotlivých logických hodnot, bylo využito možnosti, kdy nám uživatelské rozhraní nabízí importovat vlastní posloupnost bitu - read from file (viz. obr. 9.3) Tato možnost byla využita při testování vlivu modulací na optický výkon, tedy intenzitu světla. Do zdrojového souboru PN\_Sequence\_09.txt, odkud se informace načítají, byl vložen dlouhý sled log0 a následně dlouhý sled log 1. I přes takto extrémně nastavené hodnoty nedošlo k poklesu optického výkonu. V praxi se však s dlouhým počtem opakování stejné logické hodnoty nesetkáme, protože cílem každého kódování je eliminovat dlouhé sekvence stejné logické hodnoty.



Obrázek 9.2: Nastavení bitové sekvence v GUI generátoru PXI

## Závěr

Cílem této diplomové práce, bylo důkladné zpracování analýzy komunikace mezi vozidly V2V (Vehicle-to-Vehicle) s využitím současné moderní technologie LED (Light-Emitting Diode). Konkrétně se práce věnovala vlivu pokročilých modulačních formátů na změnu fotometrických veličin a homogenity vyzařovací funkce z pozice vysílací části. Pro tuto vysílací část bylo vybráno zadní světlo Škody Octavia III., s brzdovou a obrysovou funkcí využívající LED technologii.

V teoretické části se tato práce zabývá charakteristikou parametrů a vlastností zdrojů optického záření, především těch, které se využívají v automobilovém průmyslu při konstrukci světel. Zejména se jedná o technologii LED, která je i součástí světlovodu u obrysové funkce. Tato optická aplikace je dále rozebrána z hlediska vlastností, parametrů a samotného vývoje v automobilovém průmyslu. Dále je v této části uvedena technická norma, která musí být v podvědomí každého konstruktéra při výrobě světla.

Před hlavní částí bylo analyzováno dodané zadní světlo od firmy Varroc Lighting Systems s.r.o. Prvotní měření, bylo zaměřeno na zjištění základních parametrů a charakteristik obou funkcí u zadního světla. Na základě těchto výsledků bylo možné stanovit pracovní bod, který určuje střední hodnotu  $I_{F(stf)} = 280 \text{ mA}$ , což představuje 100% optického výkonu.

V této fázi bylo možné předat světlo k odbornému měření výzkumnému oddělení firmy Varroc Lighting Systems s.r.o. Výstupním protokolem byly fotometrické veličiny, které u brzdové funkce splňovaly hodnoty předpisu ECE R7 na 209 % a u obrysové funkce využívající světlovod na 294 %. Hodnoty homogenity u obou funkcí světla byly taktéž splněny.

V úvodu hlavní části, jsou zpracovány popisy použitých zařízení, navrhnout koncept vysílacího systému, konfigurace a nastavení potřebné pro chod systému. Cílem je tento systém nejdříve implementovat na každou funkci samostatně a následně zjistit zdali dochází k ovlivnění, či zhoršení komunikace vlivem současného svitu obou funkcí. Jádrem vysílacího systému je tvořenou součtovým členem Bias-Tee ZX85-12G+, který slučuje stejnosměrný signál  $I_{F(stf)} = 280 \text{ mA}$  ze zdroje se signálem generátoru  $I_F = 100 \text{ mA}$ . Tímto způsobem se tedy snižuje jen 15% optického výkonu, což je z hlediska výsledné fotometrie důležité.

Nejprve byla analyzována šířka přenosového pásma zdrojů LED a z této frekvenční charakteristiky byly určeny nosné frekvence měření modulací a tedy: 1 MHz, 3MHz, 5MHz a hraniční frekvence 11 MHz, u které již došlo k významnému poklesu výkonu o 3 dB. Generování signálů pro tento navrhovaný koncept byl prováděn pomocí hardwaru a softwaru od firmy National Instruments. V návaznosti na tuto část jsou zde rozepsány i testované pokročilé formáty modulací.

Závěrečné měření se zabývalo analýzou digitálně modulovaných signálů u brzdové funkce na vzdálenost detektoru od zdroje, nosné frekvenci modulovaného signálu, počtu přenášených symbolů a na závislosti počtu stavů jednotlivých typů modulace M-PSK a M-QAM. Vyhodnocení možnosti komunikace probíhá analýzou dosažených přenosových

rychlostí a chybovosti přenosu, v podobě parametrů MER a  $EVM_{RMS}$ . Z několika měřených variant výše uvedeným způsobem, vyšla nejlépe 32 - stavová QAM modulace, při frekvenci 3 MHz, která stabilně dosahovala nejvyšší přenosové rychlosti až 10 Mbps s malou chybovostí přenosu.

Při nasazení systému u obrysové funkce a snaha tento element modulovat se nezdařila. I při nejideálnějších předpokladech testování, tedy při nosné frekvenci 1 MHz ve vzdálenosti 0 cm, spolu s nejzákladnější BPSK modulací se neprojevil jakýkoliv náznak komunikace. I v oblasti pokusu na zarušení komunikace pomocí brzdové funkce, vlivem svitu funkce obrysové, se neprojevila. Můžeme tedy říct, že obrysová funkce nemá jakýkoliv vliv na optickou komunikaci.

Poslední důležitou úlohu hraje měření fotometrie a homogenity vyzařovaného optického záření funkcí využívající LED po integraci modulačního systému. Výsledky jsou statisticky vyhodnocené vzhledem k zákonným předpisům ECE R7 a opět jako v prvním měření stejného typu splňují potřebné limity. Při porovnání hodnoty WinFlux, což je světelný tok ve zobrazeném měřeném okně poklesl vůči prvnímu měření fotometrie o zanedbatelnou hodnotu 1,3 lm. Individuální výkyvy intenzity v měřených bodech, byly způsobeny změnou pozice PCB vůči reflektoru při demontáži světla, ke kterým dochází již při velmi malém posuvu, přibližně od 0,5 mm. Tyto hodnoty intenzity se však stále pohybují v určeném rozpětí.



## Použitá literatura

- [1] SCHUBERT, E. Light-emitting diodes. 2nd ed. Cambridge University Press, 2006. ISBN 05-218-6538-7.
- [2] Automobily BMW 750i - Galerie - autopruvodce.cz Online Galerie. [online]. [cit. 2013-05-25]. Dostupné z: [http://www.autopruvodce.cz/galerie\\_popup.php?img\\_id=88137&page=2](http://www.autopruvodce.cz/galerie_popup.php?img_id=88137&page=2)
- [3] BMW 3 Series Convertible : Daytime running lights. [online]. [cit. 2013-05-25]. Dostupné z: [http://www.bmw-kuwait.com/me\\_dl/ku\\_en/newvehicles/3series/convertible/2007/allfacts/ergonomics/daylight.html](http://www.bmw-kuwait.com/me_dl/ku_en/newvehicles/3series/convertible/2007/allfacts/ergonomics/daylight.html)
- [4] AUTOMOTIVE LIGHTING S.R.O. [online]. 2015. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: <http://www.al-lighting.cz/cs>
- [5] GLOSS, Tomáš. Měření útlumu plastových světlovodů pro výkonové aplikace [online]. 2012 [cit. 2015-05-05]. Diplomová práce. VŠB - Technical University of Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky. Vedoucí práce Vladimír Vašínek.
- [6] ELEKTROTECHNICKÝ ZKUŠEBNÍ ÚSTAV. *Homologace E8* [online]. 2015. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: <http://ezu.cz/produkty/homologace-e8/>
- [7] Odborné časopisy - Současný stav a vývoj mezinárodních předpisů pro osvětlení automobilů. [online]. [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=22897](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=22897)
- [8] AUTO-DESIGN. [online]. 2014. [cit. 2015-05-06]. Dostupné z: <http://www.auto-design.cz/default.aspx?id=1760&ido=48&sh=115345849>
- [9] POYNTON, Charles. Frequently asked questions about color [online]. [cit. 2013-03-17]. Dostupné z: <http://www.poynton.com/PDFs/ColorFAQ.pdf>
- [10] ŠVIMBERSKÝ, Z.LIN – Local Interconnect Network. Praha, 2007. 30 s. Bakalářská práce na Elektrotechnické fakultě Českého vysokého učení technického. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Krákora
- [11] *Light-emitting diode (LED)* [online]. [cit. 2015-05-06]. Dostupné z: <http://www.newey.hk/doc/led.htm>
- [12] JAREŠ, Petr. *Moderní modulační metody a jejich aplikace* [online]. [cit. 2015-05-06]. Dostupné z: [http://data.cedupoint.cz/oppa\\_e-learning/2\\_KME/163.pdf](http://data.cedupoint.cz/oppa_e-learning/2_KME/163.pdf)
- [13] DOBEŠ, Josef, ŽALUD, Václav. Moderní radioelektronika. 1. vyd. Praha : BEN, 2000. 653 s. ISBN 80-86056-47-3.
- [14] ŠÁCHA, Juraj. 1959. Světlovod. [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: [http://dml.cz/bitstream/handle/10338.dmlcz/126935/MathSlov\\_09-1959-1\\_2.pdf](http://dml.cz/bitstream/handle/10338.dmlcz/126935/MathSlov_09-1959-1_2.pdf)
- [15] *Ron Hranac Presentation-BER + MER* [online]. [cit. 2015-05-06]. Dostupné z: [http://www.academia.edu/6564958/Ron\\_Hranac\\_Presentation-BER\\_MER\\_Fun](http://www.academia.edu/6564958/Ron_Hranac_Presentation-BER_MER_Fun)

- [16] ŽÍDEK, Jan. Digitální modulace. Ostrava, 2010. Výukový materiál. VŠB - TUO. Vedoucí práce Jan Žídek.
- [17] MARTINEK, Radek; ZIDEK, Jan. The Real Implementation of ANFIS Channel Equalizer on the System of Software-Defined Radio. In Journal: IETE Journal of Research. Taylor & Francis, London, UK, 2014, Volume 60, Issue 2, pages 183-193, ISSN 0377-2063 (Print), 0974-780X (Online), DOI:10.1080/03772063.2014.914698.
- [18] MARTINEK, Radek; ZIDEK, Jan. The implementation of channel coding into the digital transmission chain consisting of VSG PXI-5670 - VSA PXI-5661. In Journal: Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), Volume 89, Issue 7, 2013, Warszawa, Poland, pp. 64-68, ISSN 0033-2097.
- [19] MARTINEK, Radek; ZIDEK, Jan; TOMALA, Karel. BER Measurement in Software Defined Radio Systems. In Journal: Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), Volume 89, Issue 2B, 2013, Warszawa, Poland, pp. 205-210, ISSN 0033-2097.
- [20] MARTINEK, Radek; ZIDEK, Jan. The real implementation of NLMS channel equalizer into the system of software defined radio. In Journal: Advances in Electrical and Electronic Engineering, Volume 10, Issue 5, December 2012, Pages 330-336, VSB - Technical University of Ostrava and University of Zilina Faculty of Electrical Engineering, ISSN 1336-1376 (Print) ISSN 1804-3119 (Online), MK CR E 20146.
- [21] MARTINEK, Radek; ZIDEK, Jan. Application of synthetic instrumentation that applies the trend of software-based approach for measuring on the field of modern wireless transfer systems. In International Journal of Digital Information and Wireless Communications (IJDWC). Volume 2, Number 3, Published by The Society of Digital Information and Wireless Communications, Kowloon, Hong Kong, 2012. pp. 208-221, ISSN: 2225-658X.
- [22] AL-WOHAISHI, Mohamed; ZIDEK, Jan; MARTINEK, Radek. Analysis of M State Digitally Modulated Signals in Communication Systems Based on SDR Concept. In Proceedings: The 6th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications; first issue. Praha, Czech Republic; IEEE Ukraine & ČVUT Praha, 2011, pp. 171-175, ISBN 978-1-4577-1423-8.
- [23] AL-WOHAISHI, Mohamed; MARTINEK, Radek; ZIDEK, Jan. Communications in Computer and Information Science, Digital Information Processing and Communications, Part II : In Proceedings of International Conference on Digital Information processing and Communications, ICDIP2011, Ostrava, Czech Republic. 1st Edition, Volume 189, Part 13. Heidelberg : Springer-Verlag Berlin, 2011. Analysis of M-QAM Data Communication

System Using 3D Eye Diagram. pp. 337-348. ISBN 978-3-642-22409-6, ISSN 1865-0929, DOI: 10.1007/978-3-642-22410-2.

- [24] VARROC LIGHTING SYSTEMS S.R.O. [online]. [cit. 2015-05-06]. Dostupné z: [24] <http://www.varroc.cz/produkty-19.html>
- [25] MARTINEK, Radek; AL WOHAISHI, Mohamed; ZIDEK, Jan. Software Based Flexible Measuring Systems for Analysis of Digitally Modulated Systems. In Conference Proceedings: The 9th Roedunet International Conference, RoEduNet. Sibiu, Romania, 24-26 June 2010, pp. 397-402, ISBN 978-1-4244-7335-9, ISSN 2068-1038.
- [26] MARTINEK, Radek. GENEROVÁNÍ DIGITÁLNĚ MODULOVANÝCH SIGNÁLŮ S VYUŽITÍM MODULÁRNÍHO SYSTÉMU HARDWAROVÉ PLATFORMY V PODOBĚ PXI VEKTOR SIGNÁLOVÉHO GENERÁTORU A KNIHOVNÍCH FUNKCÍ Z DOPLŇKOVÉ KNIHOVNY MODULATION TOOLKIT. Ostrava, 4/2011.
- [27] MARTINEK, Radek. ANALÝZA DIGITÁLNĚ MODULOVANÝCH SIGNÁLŮ S VYUŽITÍM HARDWAROVÉ PLATFORMY V PODOBĚ PXI VEKTOR SIGNÁLOVÉHO ANALYZÁTORU A KNIHOVNÍCH FUNKCÍ Z DOPLŇKOVÉ KNIHOVNY MODULATION TOOLKIT, 38 s, Ostrava, duben 2011.
- [28] MINI-CIRCUITS. Coaxial Bias-Tee: ZX85-12G+. Brooklyn, NY. Dostupné z: <http://194.75.38.69/pdfs/ZX85-12G+.pdf>.
- [29] Vertical:Reference Level (dBm) Property: NI RF Signal Generators Help. [online]. 2013 [cit.2013-05-02]. Dostupné z: [http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/372058L-01/rfsapropref/pnirfsa\\_referencelevel/](http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/372058L-01/rfsapropref/pnirfsa_referencelevel/)
- [30] HRANILOVIC, Steve, W POPOOLA a S RAJBHANDARI. Wireless optical communication systems: system and channel modelling with MATLAB. New York: Springer, 2005, xii, 196 s. ISBN 03-872-2784-9.
- [31] OSRAM. [online]. [cit. 2015-05-06]. Dostupné z: [http://www.osram.cz/osram\\_cz/](http://www.osram.cz/osram_cz/)
- [32] HABEL, Jiří. Světlo a osvětlování. Praha: FCC Public, 2013, 622 s. ISBN 978-80-86534-21-3.
- [33] *Kurz osvětlovací techniky*. 2013. [cit. 2015-05-06]. ISBN 978-80-248-3174-9. Dostupné z: <http://www.csorsostrava.cz/sborniky/Sborn%C3%ADk%20Kurz%20Osvetlovaci%20techniky%20XXX.pdf>
- [34] Svítidla a světelné přístroje. <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/44730.pdf>. *Současnost a budoucnost automobilového osvětlení* [online]. [cit. 2015-05-06].
- [35] BIMMERPOST NEWS. BMW M4 Concept Iconic Lights. Introducing BMW's LaserLight 2.0 and OLED. 2015. Dostupné z: <http://www.bimmerpost.com/?s=BMW+M4+Concept+Iconic+Lights.+Introducing+BMW%27s+LaserLight+2.0+and+OLED>.
- [36] KOOPMAN, Philip. 2013. *The FlexRay Protocol* [offline]. [cit. 2015-05-05].

# Seznam příloh

Příloha A:	Výsledky z testování vysílací části – zadní světlo Škoda Octavia III. ....	I
Příloha B:	Výsledky vyhotovené firmou Varroc Lighting Systems.....	VIII

Součástí DP je DVD.

Adresářová struktura přiloženého DVD:

1. Složka M-PSK\_diagram oka (legenda názvu: počet stavů\_typ\_vzdálenost\_frekvence)
2. Složka M-PSK\_vektorovy dia (legenda názvu: počet stavů\_typ\_vzdálenost\_frekvence)
3. Složka M-QAM\_diagram oka (legenda názvu: počet stavů\_typ\_vzdálenost\_frekvence)
4. Složka M-QAM\_vektorovy dia (legenda názvu: počet stavů\_typ\_vzdálenost\_frekvence)
5. Detail hlavního konektoru
6. Obrysová funkce
7. Brzdová funkce
8. Zadní strana světla
9. Video brzdová funkce
10. Video obrysová funkce
11. Datasheet LR G6SP
12. Datasheet ZX85-12G+
13. Frekvenční charakteristika
14. V-I-P charakteristika
15. Vyzařovací charakteristika
16. Autentické zapojení systému
17. Detektor s čočkou
18. Protokol fotometrie bez systemu\_STOP
19. Protokol fotometrie bez systemu\_TAIL
20. Protokol fotometrie se systémem\_STOP
21. Uchycení světla\_boční pohled
22. Uchycení světla\_přední pohled
23. Ukázka měření komunikace
24. Základní deska\_brzdová funkce
25. Základní deska\_kompletní
26. Goniofotometr
27. Uchycení světla\_boční pohled
28. DP\_ Studium komunikace mezi vozidly s využitím LED technologií

Příloha A: Výsledky z testování vysílací části – zadní světlo Škoda Octavia III.

Tabulka A.1: Chybovost systému vyhodnocená parametry  $EVM_{RMS}$  a MER modulací M-PSK.

Typ modulační	Nosná frekvence [MHz]	Symbolová rychlost [kHz]	-	Referenční vzdálenost [cm]			
				0	200	400	600
BPSK	1	100	$EVM_{RMS}$	0,31	1,62	4,93	9,9
			MER [dB]	43,2	32	22,4	17,2
BPSK	3	100	$EVM_{RMS}$	0,4	2,18	7,56	13
			MER [dB]	42,3	29,9	18,9	14,3
BPSK	5	100	$EVM_{RMS}$	0,37	2,18	6,17	10,8
			MER [dB]	42,3	29,9	21,1	16,8
BPSK	11	100	$EVM_{RMS}$	3,63	21,4	41,8	46,1
			MER [dB]	25,7	10,6	3,87	4,49
QPSK	1	100	$EVM_{RMS}$	0,37	2,09	5,46	13,5
			MER [dB]	42,2	31,1	22,4	14,8
QPSK	3	100	$EVM_{RMS}$	0,47	3,31	9,52	24,9
			MER [dB]	41,5	27,7	18,4	9,15
QPSK	5	100	$EVM_{RMS}$	0,42	2,28	6,95	21,8
			MER [dB]	42,2	28,9	20,9	0
QPSK	11	100	$EVM_{RMS}$	3,38	21,3	42,6	44,7
			MER [dB]	26,3	10,2	3,56	3,76
8-PSK	1	100	$EVM_{RMS}$	0,45	2,1	7,33	24,5
			MER [dB]	43,1	32,3	22,6	11,2
8-PSK	3	100	$EVM_{RMS}$	0,46	5,08	23,8	26,5
			MER [dB]	42,5	26,3	11,4	10,8
8-PSK	5	100	$EVM_{RMS}$	0,76	4,7	9,51	23,5
			MER [dB]	40,8	27,1	20,8	11,5
8-PSK	11	100	$EVM_{RMS}$	4,51	27,6	42,6	43,9
			MER [dB]	25,4	10,8	2,56	4,12
16-PSK	1	100	$EVM_{RMS}$	0,67	2,6	6,91	17,3
			MER [dB]	41,1	29,8	22,7	13,7

Typ modulace	Nosná frekvence [MHz]	Symbolová rychlost [kHz]	-	Referenční vzdálenost [cm]			
				0	200	400	600
16-PSK	3	100	$EVM_{RMS}$	0,78	4,08	12,8	20,9
			MER [dB]	40,7	27	18,8	14,4
16-PSK	5	100	$EVM_{RMS}$	0,77	4,67	15	19,9
			MER [dB]	39,7	28,4	14,8	15
16-PSK	11	100	$EVM_{RMS}$	5,33	21,7	43,1	43,7
			MER [dB]	25	15	3,02	3,65

Tabulka A.1: Chybovost systému (bez čočky) vyhodnocená  $EVM_{RMS}$  a MER modulací M-PSK.

Typ modulace	Nosná frekvence [MHz]	Symbolová rychlost [kHz]	-	Referenční vzdálenost [cm]			
				0	20	40	60
BPSK	1	100	$EVM_{RMS}$	0,97	3,96	13,9	16,6
			MER [dB]	40,3	28,1	17,2	15,6
BPSK	3	100	$EVM_{RMS}$	0,87	4,95	19,9	21,8
			MER [dB]	41,2	26,1	14	13,3
BPSK	5	100	$EVM_{RMS}$	0,91	4,68	15,8	21
			MER [dB]	40,8	26,6	16	13,5
BPSK	11	100	$EVM_{RMS}$	12,4	48,4	81,1	77,7
			MER [dB]	18,2	6,3	1,82	2,19
QPSK	1	100	$EVM_{RMS}$	0,81	3,35	12,7	16,4
			MER [dB]	41,8	29,5	17,9	15,7
QPSK	3	100	$EVM_{RMS}$	0,94	4,9	18,8	22,6
			MER [dB]	40,6	26,2	14,5	12,9
QPSK	5	100	$EVM_{RMS}$	1,02	4,57	17,6	22
			MER [dB]	39,8	26,8	15,1	13,2
QPSK	11	100	$EVM_{RMS}$	13,3	41,4	58,8	54,5
			MER [dB]	17,6	7,76	4,62	5,44
8-PSK	1	100	$EVM_{RMS}$	0,75	3,61	14	26,3
			MER [dB]	42,5	28,9	17,1	11,6

Typ modulace	Nosná frekvence [MHz]	Symbolová rychlost [kHz]	-	Referenční vzdálenost [cm]			
				0	20	40	60
8-PSK	3	100	EVM <sub>RMS</sub>	0,88	5,05	27,8	25,1
			MER [dB]	41,1	25,9	11,1	12,1
8-PSK	5	100	EVM <sub>RMS</sub>	0,92	4,37	16,6	26,5
			MER [dB]	40,7	27,2	15,6	11,5
8-PSK	11	100	EVM <sub>RMS</sub>	11,7	35,9	51,2	47,8
			MER [dB]	18,6	8,91	5,82	6,42
16-PSK	1	100	EVM <sub>RMS</sub>	0,78	3,54	14	16,3
			MER [dB]	42,2	29	16,1	15,8
16-PSK	3	100	EVM <sub>RMS</sub>	0,93	5,41	19,8	18,7
			MER [dB]	40,6	25,3	14,1	14,6
16-PSK	5	100	EVM <sub>RMS</sub>	0,92	4,58	15,6	17,9
			MER [dB]	40,8	26,8	16,1	14,9
16-PSK	11	100	EVM <sub>RMS</sub>	13,5	30	47,8	44,9
			MER [dB]	17,4	10,3	6,42	6,95

Tabulka A.1: Chybovost systému vyhodnocená EVM<sub>RMS</sub> a MER modulací M-QAM.

Typ modulace	Nosná frekvence [MHz]	Symbolová rychlost [kHz]	-	Referenční vzdálenost [cm]			
				0	200	400	600
4-QAM	1	100	EVM <sub>RMS</sub>	0,31	1,62	4,93	9,9
			MER [dB]	43,2	32	22,4	17,2
4-QAM	3	100	EVM <sub>RMS</sub>	0,4	2,18	7,56	13
			MER [dB]	42,3	29,9	18,9	14,3
4-QAM	5	100	EVM <sub>RMS</sub>	0,37	2,18	6,17	10,8
			MER [dB]	42,3	29,9	21,1	16,8
4-QAM	11	100	EVM <sub>RMS</sub>	3,63	21,4	41,8	46,1
			MER [dB]	25,7	10,6	3,87	4,49
8-QAM	1	100	EVM <sub>RMS</sub>	9,9	2,09	5,46	13,5
			MER [dB]	17,2	31,1	22,4	14,8

Typ modulace	Nosná frekvence [MHz]	Symbolová rychlost [kHz]	-	Referenční vzdálenost [cm]			
				0	200	400	600
8-QAM	3	100	EVM <sub>RMS</sub>	13	3,31	9,52	24,9
			MER [dB]	14,3	27,7	18,4	9,15
8-QAM	5	100	EVM <sub>RMS</sub>	10,8	2,28	6,95	21,8
			MER [dB]	16,8	28,9	20,9	0
8-QAM	11	100	EVM <sub>RMS</sub>	46,1	21,3	42,6	44,7
			MER [dB]	4,49	10,2	3,56	3,76
16-QAM	1	100	EVM <sub>RMS</sub>	0,45	2,1	7,33	24,5
			MER [dB]	43,1	32,3	22,6	11,2
16-QAM	3	100	EVM <sub>RMS</sub>	0,46	5,08	23,8	26,5
			MER [dB]	42,5	26,3	11,4	10,8
16-QAM	5	100	EVM <sub>RMS</sub>	0,76	4,7	9,51	23,5
			MER [dB]	40,8	27,1	20,8	11,5
16-QAM	11	100	EVM <sub>RMS</sub>	4,51	27,6	42,6	43,9
			MER [dB]	25,4	10,8	2,56	4,12
32-QAM	1	100	EVM <sub>RMS</sub>	0,67	2,6	6,91	17,3
			MER [dB]	41,1	29,8	22,7	13,7
32-QAM	3	100	EVM <sub>RMS</sub>	0,78	4,08	12,8	20,9
			MER [dB]	40,7	27	18,8	14,4
32-QAM	5	100	EVM <sub>RMS</sub>	0,77	4,67	15	19,9
			MER [dB]	39,7	28,4	14,8	15
32-QAM	11	100	EVM <sub>RMS</sub>	5,33	21,7	43,1	43,7
			MER [dB]	25	15	3,02	3,65
64-QAM	1	100	EVM <sub>RMS</sub>	0,65	4,11	9,32	17,1
			MER [dB]	41,3	29,6	22,6	16,7
64-QAM	3	100	EVM <sub>RMS</sub>	0,71	5,38	12,7	17,2
			MER [dB]	41,1	27	16,9	16,1
64-QAM	5	100	EVM <sub>RMS</sub>	0,86	10,6	11	14,9
			MER [dB]	37,7	17,2	20,5	16



Typ modulační	Nosná frekvence [MHz]	Symbolová rychlost [kHz]	-	Referenční vzdálenost [cm]			
				0	200	400	600
64-QAM	11	100	EVM <sub>RMS</sub>	4,69	14,7	43,8	44
			MER [dB]	25,4	10,2	2,99	4,19
128-QAM	1	100	EVM <sub>RMS</sub>	0,7	4,69	10,6	11,3
			MER [dB]	39,5	29,2	20,3	20,4
128-QAM	3	100	EVM <sub>RMS</sub>	0,69	7,15	12,4	11,9
			MER [dB]	42,2	21	20,3	19,3
128-QAM	5	100	EVM <sub>RMS</sub>	0,63	4,34	12,4	11,6
			MER [dB]	41,8	26,2	20,2	20,1
128-QAM	11	100	EVM <sub>RMS</sub>	5,63	13,2	42,5	43,5
			MER [dB]	25,3	20,4	3,21	4,12
256-QAM	1	100	EVM <sub>RMS</sub>	0,46	5,7	9,5	10,5
			MER [dB]	41,5	28,9	21,4	19,3
256-QAM	3	100	EVM <sub>RMS</sub>	0,71	5,21	7,83	10,7
			MER [dB]	41,3	23,5	21,9	19,5
256-QAM	5	100	EVM <sub>RMS</sub>	0,92	7,27	8,86	10,9
			MER [dB]	40,1	20,8	21,1	20,7
256-QAM	11	100	EVM <sub>RMS</sub>	5,67	10,2	42,2	43,7
			MER [dB]	23,7	10,1	3,32	4,44

Tabulka A.1: Přenosová rychlost systému u modulací M-PSK

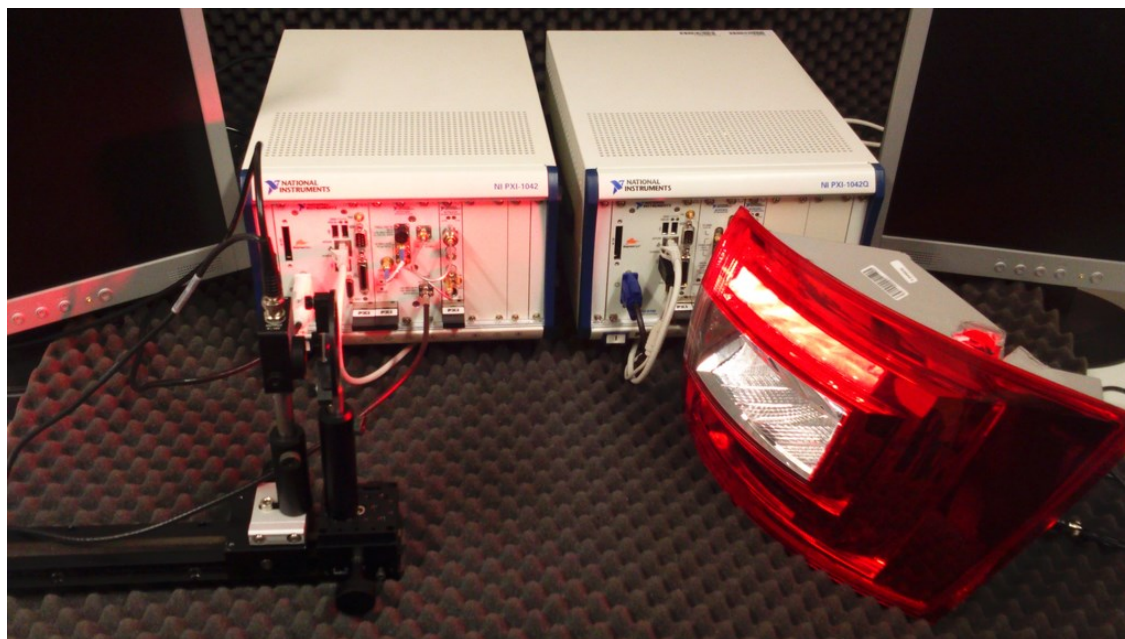
Typ modulační	Nosná frekvence [MHz]	Referenční vzdálenost [cm]				Referenční vzdálenost [cm]			
		0	200	400	600	0	200	400	600
		Symbolová rychlost [MHz]				Přenosová rychlost [Mbit/s]			
BPSK	1	1000	1000	1000	800	1000	1000	1000	800
BPSK	3	3000	3000	2500	400	3000	3000	2500	400
BPSK	5	4700	4700	3300	500	4700	4700	3300	500
BPSK	11	1900	1400	0	0	1900	1400	0	0
QPSK	1	1000	1000	900	300	2000	2000	1800	600
QPSK	3	3000	2700	2200	150	6000	5400	4400	300

Typ modulace	Nosná frekvence [MHz]	Referenční vzdálenost [cm]				Referenční vzdálenost [cm]			
		0	200	400	600	0	200	400	600
		Symbolová rychlost [MHz]				Přenosová rychlost [Mbit/s]			
QPSK	5	1800	1800	1350	200	3600	3600	2700	400
QPSK	11	800	450	0	0	1600	900	0	0
8-PSK	1	600	500	300	100	1800	1500	900	300
8-PSK	3	2500	2250	700	0	7500	6750	2100	0
8-PSK	5	1300	850	400	0	3900	2550	1200	0
8-PSK	11	400	150	0	0	1200	450	0	0
16-PSK	1	400	200	100	0	1600	800	400	0
16-PSK	3	1900	1350	100	0	7600	5400	400	0
16-PSK	5	1000	850	200	50	4000	3400	800	200
16-PSK	11	200	50	0	0	800	200	0	0

Tabulka A.1: Přenosová rychlost systému u modulací M-QAM.

Typ modulace	Nosná frekvence [MHz]	Referenční vzdálenost [cm]				Referenční vzdálenost [cm]			
		0	200	400	600	0	200	400	600
		Symbolová rychlost [MHz]				Přenosová rychlost [Mbit/s]			
4-QAM	1	1100	1100	900	300	2200	2200	1800	600
4-QAM	3	3100	2700	1300	500	6200	5400	2600	1000
4-QAM	5	2400	1900	1200	600	4800	3800	2400	1200
4-QAM	11	600	200	100	50	1200	400	200	100
8-QAM	1	700	650	350	200	2100	1950	1050	600
8-QAM	3	2900	2500	700	300	8700	7500	2100	900
8-QAM	5	1400	1000	400	200	4200	3000	1200	600
8-QAM	11	400	100	50	0	1200	300	150	0
16-QAM	1	600	350	150	50	2400	1400	600	200
16-QAM	3	2500	1700	300	50	10000	6800	1200	200
16-QAM	5	600	500	200	50	2400	2000	800	200
16-QAM	11	200	50	0	0	800	200	0	0
32-QAM	1	300	200	100	50	1500	1000	500	250
32-QAM	3	2100	500	300	150	10500	2500	1500	750
32-QAM	5	400	350	150	50	2000	1750	750	250
32-QAM	11	50	0	0	0	250	0	0	0
64-QAM	1	150	50	0	0	900	300	0	0
64-QAM	3	1700	100	50	0	10200	600	300	0

Typ modulace	Nosná frekvence [MHz]	Referenční vzdálenost [cm]				Referenční vzdálenost [cm]			
		0	200	400	600	0	200	400	600
		Symbolová rychlost [MHz]				Přenosová rychlost [Mbit/s]			
64-QAM	5	250	100	50	0	1500	600	300	0
64-QAM	11	0	0	0	0	0	0	0	0
128-QAM	1	50	0	0	0	350	0	0	0
128-QAM	3	1300	100	50	0	9100	700	350	0
128-QAM	5	100	50	0	0	700	350	0	0
128-QAM	11	0	0	0	0	0	0	0	0
256-QAM	1	0	0	0	0	0	0	0	0
256-QAM	3	1000	50	0	0	7000	350	0	0
256-QAM	5	0	0	0	0	0	0	0	0
256-QAM	11	0	0	0	0	0	0	0	0



Obrázek A.1: Autentická fotografie experimentálního pracoviště pro testování VLC komunikace.

ECE 7 STOP FUNCTION (S1) MULTISOURCE > 750mm															
P Min	[ 45,-14.5]	0.745 > 0.3 cd	248%	P 5U-10L	[ -10, 5]	260 > 45.5 > 12 cd	379%	P H-5L	[ -5, 0]	260 > 113 > 54 cd	209%	P 5D-10L	[ -10, -5]	260 > 75.8 > 12 cd	631%
P Max	[ 0, -3.5]	151 < 260 cd	58%	P 5U-V	[ 0, 5]	260 > 119 > 42 cd	284%	P H-V	[ 0, 0]	260 > 143 > 60 cd	238%	P 5D-V	[ 0, -5]	260 > 147 > 42 cd	349%
P 10U-5L	[ -5, 10]	260 > 33.3 > 12 cd	277%	P 5U-10R	[ 10, 5]	260 > 86.2 > 12 cd	718%	P H-5R	[ 5, 0]	260 > 129 > 54 cd	238%	P 5D-10R	[ 10, -5]	260 > 93.2 > 12 cd	777%
P 10U-5R	[ 5, 10]	260 > 52.9 > 12 cd	441%	P 5U-20R	[ 20, 5]	260 > 13.7 > 6 cd	228%	P H-10R	[ 10, 0]	260 > 101 > 21 cd	479%	P 5D-20R	[ 20, -5]	260 > 16.1 > 6 cd	268%
P 5U-20L	[ -20, 5]	260 > 14.7 > 6 cd	245%	P H-10L	[ -10, 0]	260 > 71.9 > 21 cd	342%	P 5D-20L	[ -20, -5]	260 > 19.4 > 6 cd	324%	P 10D-5L	[ -5, -10]	260 > 84.1 > 12 cd	701%
												P 10D-5R	[ 5, -10]	260 > 66.6 > 12 cd	555%
												P LINE-D	[ 45, -15]	0.791 > 0.3 cd	264%
												P LINE-U	[ 45, 15]	0.92 > 0.3 cd	307%
												P LINE-M45	[ -45, 15]	5.47 > 0.3 cd	1824%
												P LINE-P45	[ 45,-14.5]	0.745 > 0.3 cd	248%

Obrázek A.2: Protokol intenzit v testovaných měřicích bodech brzdové funkce zadního světla Škoda Octavia III. bez vysílacího systému.

ECE 7 REAR TAIL - RIGHT - MULTISOURCE															
P Min	[ 45,14.5]	0.157 > 0.05 cd	314%	P 5U-10L	[ -10, 5]	17 > 12.7 > 0.8 cd	1590%	P H-5L	[ -5, 0]	17 > 14.6 > 3.6 cd	406%	P 5D-10L	[ -10, -5]	17 > 13 > 0.8 cd	1621%
P Max	[ -5.5,-1.5]	14.7 < 17 cd	86%	P 5U-V	[ 0, 5]	17 > 13.8 > 2.8 cd	491%	P H-V	[ 0, 0]	17 > 13.6 > 4 cd	339%	P 5D-V	[ 0, -5]	17 > 12.5 > 2.8 cd	447%
P 10U-5L	[ -5, 10]	17 > 11.9 > 0.8 cd	1486%	P 5U-10R	[ 10, 5]	17 > 8.07 > 0.8 cd	1009%	P H-5R	[ 5, 0]	17 > 10.6 > 3.6 cd	294%	P 5D-10R	[ 10, -5]	17 > 6.52 > 0.8 cd	815%
P 10U-5R	[ 5, 10]	17 > 9.73 > 0.8 cd	1216%	P 5U-20R	[ 20, 5]	17 > 4.41 > 0.4 cd	1101%	P H-10R	[ 10, 0]	17 > 5.42 > 1.4 cd	387%	P 5D-20R	[ 20, -5]	17 > 3.6 > 0.4 cd	899%
P 5U-20L	[ -20, 5]	17 > 9.04 > 0.4 cd	2260%	P H-10L	[ -10, 0]	17 > 13.3 > 1.4 cd	949%	P 5D-20L	[ -20, -5]	17 > 9.26 > 0.4 cd	2315%	P 10D-5L	[ -5, -10]	17 > 12.2 > 0.8 cd	1526%
												P 10D-5R	[ 5, -10]	17 > 7.83 > 0.8 cd	979%
												P 15D	[ 45, -15]	0.173 > 0.05 cd	346%
												P 15U	[ 45, 15]	0.163 > 0.05 cd	326%
												P 80L	[ -80, 15]	0.925 > 0.05 cd	1850%
												P 45R	[ 45,14.5]	0.157 > 0.05 cd	314%

Obrázek A.3: Protokol intenzit v testovaných měřicích bodech obrysové funkce zadního světla Škoda Octavia III. bez vysílacího systému.

ECE 7 STOP FUNCTION (S1) MULTISOURCE > 750mm															
P Min	[ 45,-15]	0.357 > 0.3 cd	119%	P 5U-10R	[ 10, 5]	260 > 77.4 > 12 cd	645%	P 5D-20L	[ -20, -5]	260 > 26.5 > 6 cd	442%	P LINE-D	[ 45,-15]	0.357 > 0.3 cd	119%
P Max	[ -2, -1]	159 < 260 cd	61%	P 5U-20R	[ 20, 5]	260 > 8.06 > 6 cd	134%	P 5D-10L	[ -10, -5]	260 > 98 > 12 cd	817%	P LINE-U	[ 45, 15]	0.831 > 0.3 cd	277%
P 10U-5L	[ -5, 10]	260 > 87.5 > 12 cd	730%	P H-10L	[ -10, 0]	260 > 108 > 21 cd	514%	P 5D-V	[ 0, -5]	260 > 122 > 42 cd	290%	P LINE-M45	[ -45, 15]	7.28 > 0.3 cd	2425%
P 10U-5R	[ 5, 10]	260 > 79.6 > 12 cd	664%	P H-5L	[ -5, 0]	260 > 152 > 54 cd	282%	P 5D-10R	[ 10, -5]	260 > 51.3 > 12 cd	427%	P LINE-P45	[ 45,-15]	0.357 > 0.3 cd	119%
P 5U-20L	[ -20, 5]	260 > 24.7 > 6 cd	412%	P H-V	[ 0, 0]	260 > 150 > 60 cd	250%	P 5D-20R	[ 20, -5]	260 > 6.89 > 6 cd	115%				
P 5U-10L	[ -10, 5]	260 > 91.1 > 12 cd	759%	P H-5R	[ 5, 0]	260 > 125 > 54 cd	232%	P 10D-5L	[ -5, -10]	260 > 49.4 > 12 cd	412%				
P 5U-V	[ 0, 5]	260 > 139 > 42 cd	332%	P H-10R	[ 10, 0]	260 > 83.7 > 21 cd	399%	P 10D-5R	[ 5, -10]	260 > 23.9 > 12 cd	199%				

Obrázek A.4: Protokol intenzit v testovaných měřicích bodech brzdové funkce zadního světla Škoda Octavia III. s vysílacím systémem.